



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Oskari Loikkanen

Olemassa olevan toimistorakennuksen energiaratkaisujen optimointi

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 9.1.2017

Valvoja: Professori Risto Lahdelma

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Ville Räikkönen

Tekijä Oskari Loikkanen

Työn nimi Olemassa olevan toimistorakennuksen energiaratkaisujen optimointi

Koulutusohjelma Energia- ja LVI-tekniikka

Pää-/sivuaine Energiatekniikka

Koodi K3007

Työn valvoja Risto Lahdelma

Työn ohjaaja DI Ville Räikkönen

Päivämäärä 9.1.2017

Sivumäärä 91+6

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Rakennukset ja rakentaminen aiheuttavat noin 40 % Suomen CO₂-päästöistä, joten päästötavoitteet saavuttaakseen Suomen tulee parantaa merkittävästi myös olemassa olevien rakennusten energiatehokkuutta. Työssä tutkittiin 80-luvun loppupuolella rakennettua Colosseum-toimistorakennusta ja siihen soveltuvia energiaratkaisuja. Kiinteistön omistajan kannalta tärkein taloudellinen mittari on kiinteistön käyttöaste, minkä vuoksi työssä arvioitiin myös ehdotettujen energiaratkaisujen mahdollisia vaikutuksia kiinteistön houkuttelevuuteen vuokramarkkinoilla ja siten kiinteistön käyttöasteeseen.

Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin hajautetun energiantuotannon ratkaisuihin ja tulevaisuuden energiatrendeihin, jonka perusteella potentiaalisimmat energiaratkaisut valittiin tarkempaan tarkasteluun. Energiaratkaisujen laskennassa hyödynnettiin työkaluina muun muassa Earth Energy Designer-ohjelmaa maalämpölaskennassa sekä dynaamista laskentatyökalua IDA ICE:a sisäpihan kattamisen osalta. Parhaiden energiaratkaisujen valinnassa hyödynnettiin stokastista monikriteeristä arvostusanalyysia (SMAA) ja Monte Carlo-simulointiin pohjautuvaa SMAA-työkalua. Mallin kriteereiksi valittiin sisäisen korkokannan, E-lukuvaikutuksen sekä CO₂-päästövähennyksen lisäksi myös ratkaisujen vaikutus kiinteistön houkuttelevuuteen vuokramarkkinoilla, jonka arvot määritettiin asiantuntijapaneelin avulla.

SMAA-analyysi suoritettiin aluksi ilman asiakasedustajan preferenssidataa, jotta saatiin informaatiota kriteerien painotuksen vaikutuksesta lopputulokseen. Yhtälailla analyysi suoritettiin huomioimalla asiakasedustajan preferenssit informaation saamiseksi tarkasteluvaihtoehtojen todellisesta hyväksyttävyydestä. Analyysissa huomioitiin myös vaihtoehtojen osalta 2 eri skenaariota. Jälkimmäisessä rajattiin pois ne vaihtoehdot, jotka edellyttäisivät nykyisen lämmönjakojärjestelmän saneerausta vesikiertoiseen.

Preferenssidata huomioiden, SMAA-analyysin perusteella paras vaihtoehto oli katolle ja julkisivulle asennettavat aurinkosähköjärjestelmät oletuksella, että kiinteistössä ei tehdä suurempaa saneerausta. Mikäli mahdollisuus suurempaan saneeraukseen huomioidaan, on vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimiva maalämpöjärjestelmä 400 m syvyisillä kaivoilla paras ratkaisu. Mikään vaihtoehtoista ei ollut varsinaisesti kustannustehokas pelkän energian takaisinmaksuajan valossa, mutta soveltuvimpien ratkaisujen toteuttamista puoltavat arvioidut positiiviset vaikutukset kiinteistön houkuttelevuuteen vuokramarkkinoilla.

Avainsanat Toimistorakennus, hajautettu energia, aurinkosähkö, maalämpö, optimointi, monikriteerianalyysi, SMAA

Author Oskari Loikkanen

| | | |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| Title of thesis Optimization of energy solutions for an existing office building | | |
| Degree programme Energy and HVAC-Technology | | |
| Major/minor Energy technology | Code K3007 | |
| Thesis supervisor Professor Risto Lahdelma | | |
| Thesis advisor(s) Ville Räikkönen M.Sc. (Tech.) | | |
| Date 9.1.2017 | Number of pages 91+6 | Language Finnish |

Abstract

Buildings and their construction account for 40 % of CO₂-emissions in Finland. In order to reach the current emissions goals, Finland must significantly improve its energy efficiency also in existing buildings in addition to new buildings. To examine energy efficiency of existing buildings, this study evaluated the most suitable energy solutions for an existing office building “Colosseum”. However, the most important economic criterion for the estate owner is the occupancy rate of the estate. Therefore, the potential energy solutions were also evaluated considering their impact on the attractiveness of the building in the rental market.

In the literature review, distributed energy generation and future energy trends were reviewed in order to choose the most potential energy solutions for the client needs. These solutions chosen for more precise analysis included different configurations of solar power, ground source heat, and roof constructions, along with district heating. The main energy calculation tools utilized in this study included The Earth Energy Designer and the IDA ICE. In order to achieve the most suitable energy solutions for the building, stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA) was utilized as the main evaluation method. The chosen criteria for this analysis were internal rate of return, E-value, reduction in CO₂ emissions, and the effect on the attractiveness of the building in the rental markets. The values for the attractiveness criteria were defined with an expert panel.

The SMAA-analyses were conducted both with and without the preference information of the client representative in order to achieve information considering the acceptability of the solutions. In addition, two scenarios considering the potential options were executed. The second scenario excluded options with substantial renovation, for the possible harm they might cause for the tenants. As a result, the most acceptable solution with the preference information was geothermal heat with waterborne distribution system with 400 m boreholes. In the scenario where substantial renovation is not possible, the most acceptable solution was the solar panel system on the roof and on the façade. However, every option was rather cost-ineffective considering their energy payback time. On the other hand, when considering also the effect on the attractiveness of the building in the rental markets, the potential options may be justified.

Keywords Office buildings, distributed generation, geothermal heat, photovoltaics, optimizing, multicriteria decision analysis, SMAA

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Optiplan Oy:lle vuonna 2016 ja se on tehty työeläkevakuutusyhtiö ELO:n toimeksiantona. Diplomityön ovat rahoittaneet ELO sekä Optiplan Oy. Työssä on tarkasteltu olemassa olevan toimistorakennusten optimaalisia energiantuotantoratkaisuja ja sen tavoitteena oli tuottaa informaatiota kiinteistönomistajan päätöksentekoa varten.

Suuret kiitokset kuuluvat työni ohjaajalle DI Ville Räikköselle, joka ohjasi minut tämän mielenkiintoisen aiheen pariin ja tuki minua kannustavalla palautteellaan koko diplomityöprosessin ajan. Haluan esittää suuret kiitokset myös työni valvojalle professori Risto Lahdelmalle asiantuntevista neuvoista työhön ja erityisesti SMAA-malliin liittyen.

Haluan kiittää työnantajaani Optiplania tämä työn mahdollistamisesta sekä kaikkia työtovereita, jotka ovat kannustaneet ja tukeneet minua koko diplomityöprosessin ajan. Haluan kiittää Optiplanin henkilöstöstä ohjaajani lisäksi etenkin Mikael Friskopfia ja Kimmo Liljeströmiä. Mikaelille kiitokset varsinkin kahvipöytäkeskusteluista, jotka helpottivat työn prosessointia huomattavasti. Kiitokset kuuluvat myös kaikille muille henkilöille, jotka ovat omalla kannustavalla panoksellaan edesauttaneet työni valmistumista.

Suurin kiitos kuuluu kuitenkin Suville, joka on tukenut ja auttanut minua koko opiskelun ajan. Haluan esittää kiitokset myös perheelleni sekä ystäväilleni.

Espoossa 9.1.2017

Oskari Loikkanen

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Tiivistelmä | |
| Abstract | |
| Alkusanat | |
| Sisällysluettelo | 1 |
| Merkinnät | 3 |
| Lyhenteet | 4 |
| 1 Johdanto | 1 |
| 1.1 Työn tausta | 1 |
| 1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset | 2 |
| 1.3 Tutkimusmenetelmät | 2 |
| 1.4 Työn rakenne | 3 |
| 2 Tulevaisuuden energiatrendit | 4 |
| 2.1 Ohjauskeinojen vaikutus | 4 |
| 2.1.1 Päästökauppa | 4 |
| 2.1.2 Uusiutuvan energian tuet | 5 |
| 2.2 Sähkön hinnan muodostuminen Suomessa | 6 |
| 2.3 Sähkön hintakehityksen taustatekijät | 8 |
| 3 Tutkittava kohde - Colosseum | 11 |
| 4 Rakennuksen energiankulutus | 13 |
| 4.1 Mittarointi | 16 |
| 5 Energiantuotantojärjestelmien kuvaus | 17 |
| 5.1 Aurinkopaneelit | 17 |
| 5.2 Polttokennot | 18 |
| 5.3 Lämpöpumput | 21 |
| 5.4 Bioenergian hyödyntäminen | 21 |
| 5.5 Pientuulivoima | 22 |
| 6 Kiinteistötalouden näkökulma | 25 |
| 6.1 Vihreiden rakennusten markkinointi | 26 |
| 7 Energiaratkaisujen tarkemmat tarkastelut | 30 |
| 7.1 Aurinkosähkön hyödyntäminen Colosseumissa | 30 |
| 7.1.1 Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus | 30 |
| 7.1.2 Aurinkosähkön tuotto eri laskentatapauksilla | 34 |
| 7.1.3 Kustannukset | 35 |
| 7.1.4 Aurinkopaneelikatot sähköautoille | 39 |
| 7.2 Maalämmön hyödyntäminen Colosseumissa | 42 |
| 7.2.1 Kustannukset | 47 |
| 7.3 Sisäpihan kattaminen | 49 |
| 7.3.1 Kustannukset | 56 |
| 8 Monikriteerimalli | 57 |
| 8.1 Monikriteerianalyysi | 57 |
| 8.2 SMAA-mallin kuvaus | 57 |
| 8.2.1 Käytetty monikriteerimalli | 58 |
| 8.2.2 Kriteerien vaatimukset | 58 |
| 8.3 SMAA-mallin tuottamat tulokset | 59 |
| 8.3.1 Sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit | 59 |
| 8.3.2 Keskeiset painotusvektorit | 59 |
| 8.3.3 Uskottavuusindeksi | 59 |
| 8.3.4 Parittainen voittoindeksi | 60 |

| | | |
|-------|--|----|
| 8.4 | Monikriteerimallin tarkasteluvaihtoehdot | 60 |
| 8.5 | Valintakriteerit..... | 61 |
| 8.5.1 | Houkuttelevuuskaiteeri | 62 |
| 8.5.2 | E-luku | 63 |
| 8.5.3 | Päästövähennykset | 65 |
| 8.5.4 | Sisäinen korkokanta | 65 |
| 8.6 | Laskennan epävarmuudet | 67 |
| 8.7 | Laskennan tulokset | 69 |
| 9 | Johtopäätökset..... | 75 |
| 10 | Jatkotutkimusehdotukset | 80 |
| 11 | Yhteenveto | 81 |
| | Lähdeluettelo..... | 82 |
| | Liiteluettelo | |
| | Liite 1. Asiantuntijajaneelin tulokset | |

Merkinnät

| | | |
|------------|-------|--|
| d_{\min} | [m] | aurinkopaneelien asennusväli |
| γ_a | [°] | auringon korkeuskulma |
| β | [°] | aurinkopaneelin kallistuskulma |
| b | [m] | aurinkopaneelin korkeus/leveys |
| NPV | [€] | investoinnin nettonykyarvo |
| T_i | [€] | investoinnista aiheutuvat tulot vuonna i |
| K_i | [€] | investoinnista aiheutuvat kulut vuonna i |
| r | [€] | investoinnin korkokanta |
| u_{ci} | [-] | vaihtoehdon i yhdistetty standardiepävarmuus |
| E_i | [MWh] | vaihtoehdolla i tuotettu/säästetty energiamäärä |
| r | [-] | sijaluku |
| b_i^r | [%] | hyväksyttävyyssindeksi vaihtoehdolle i sijaluvulla r |
| $W_i^r(x)$ | [-] | painot w jotka asettavat vaihtoehdon i sijaluvulle r |
| w_i^c | [%] | keskeinen painotusvektori vaihtoehdolle i |
| p_i^c | [%] | uskottavuusindeksi vaihtoehdolle i |
| K | [€] | investointikustannus |
| Δ_x | [-] | parametrin x standardiepävarmuus |

Lyhenteet

| | |
|-----------------|--|
| BREEAM | Building Research Establishment Environmental Assessment Method, isobritannialainen ympäristösertifiointijärjestelmä |
| CHP | Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto |
| CO ₂ | Hiilidioksidi |
| COP | Coefficient of Performance, lämpökerroin |
| EED | Earth Energy Designer, maalämmön mitoitusohjelma |
| IDA ICE | IDA Indoor Climate and Energy, dynaaminen simulointiohjelmisto |
| IRR | Internal Rate of Return, sisäinen korkokanta |
| IV | Ilmanvaihto |
| LEED | Leadership in Energy & Environmental Design, yhdysvaltalainen ympäristösertifiointijärjestelmä |
| LTO | Lämmöntalteenotto |
| NPV | Net Present Value, nettonykyarvo |
| SFP | Specific Fan Power, ilmanvaihdon ominaissähköteho |
| SMAA | Stochastic multicriteria acceptability analysis, stokastinen monikriteerinen arvostusanalyysi |
| SOFC | Solid Oxide Fuel Cell, kiinteäoksidipolttokenno |
| TRT | Thermal Response Test, terminen vastetestti |

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Pariisin ilmastokokouksessa Suomi sitoutui yhdessä muiden EU-maiden kanssa vähentämään päästöjään keskimäärin 40 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Ilmastokokouksen päämääränä oli sopia globaalisti selkeistä päästövähennystavoitteista, jotta ilmaston lämpeneminen saadaan rajoitettua alle kahteen asteeseen. (Laurikka ym. 2015) Suomessa syntyneistä kasvihuonekaasupäästöistä jopa noin kolmasosa aiheutuu rakennusten energiankulutuksesta. (Heljo ym. 2005) Yhteensä rakennukset ja rakentaminen muodostavat noin 40 % Suomen päästöistä. (Hernberg 2014) Keskittymällä pelkästään uudisrakennusten energiatehokkuuteen ei kuitenkaan saada riittävästi päästövähennyksiä aikaan, sillä rakennuskanta uusiutuu varsin hitaasti. Tämän takia vuoteen 2030 mennessä tulee parantaa merkittävästi myös olemassa olevien rakennusten energiatehokkuutta. Tärkeitä kriteereitä niin kiinteistönomistajien kuin ympäristönkin näkökulmasta ovat rakennusten pitkä elinkaari ja niiden tarkoituksenmukainen käyttö. Olemassa olevan rakennuksen saneeraus ja käytön jatkaminen tuottavat huomattavasti vähemmän rasitusta ympäristölle sekä pienemmät kustannukset kiinteistönomistajalle kuin rakennuksen purkaminen ja uuden rakentaminen tilalle. (Hernberg 2014) Tämän vuoksi uudisrakennuksissa pyritään nykyään painottamaan niiden muuntojoustavuutta, joka tarkoittaa rakennuksen kykyä mukautua sen elinkaaren aikana käyttötarkoituksen muutoksiin. Muuntojoustavat rakennukset pystyvät paremmin vastaamaan käyttäjien muuttuviin tarpeisiin.

Ylitarjonnasta johtuva toimistotilojen vajaakäyttö on pääkaupunkiseudulla merkittävä ongelma. Toimistorakennusten kilpailukyky markkinoilla määräytyy useasta tekijästä, joista tärkeimpänä yleensä pidetään kiinteistön sijaintia. Olemassa olevien toimistorakennusten sijaintiin ei voida kuitenkaan enää vaikuttaa, joten niiden osalta on kilpailtava muiden keinojen avulla. Yritysten ympäristövastuun merkityksen lisääntyessä kiinteistön modernit ja energiatehokkaat energiaratkaisut korostuvat yhä enemmän yhtenä kilpailutekijänä. (Hernberg 2014)

Tässä diplomityössä tutkitaan olemassa olevan toimistorakennuksen energiaratkaisuja. Työssä tarkastellaan näiden uusien energiaratkaisuiden mahdollisuuksia tehostaa kiinteistön energiankäyttöä ja nostaa kiinteistön houkuttelevuutta vuokralaisten silmissä. Perinteisten teknisten ja kustannustarkasteluiden ohella työssä arvioidaan ehdotettujen energiaratkaisuiden mahdollisia vaikutuksia kiinteistön käyttöasteeseen. Lisäksi työssä analysoidaan kiinteistön tämän hetkistä energiankulutusta sekä energiatehokkuutta.

Tutkittava kohde on vuonna 1988 valmistunut entinen Imatran Voiman pääkonttori. Rakennuksella on historiallisesti maine suurena sähkönkuluttajana, vaikka nykyään toimisto lämpeneekin suurelta osin kaukolämmöllä. Tämä mielikuva kuitenkin vaikuttaa negatiivisesti rakennuksen käyttöasteeseen, joka on kiinteistön omistajan näkökulmasta tärkein tuottavuuden mittari. Käyttöaste kertoo, kuinka monta prosenttia kiinteistön vuokrattavista tiloista on käytössä. Tähän vaikuttaa merkittävästi kiinteistön vuokralaisten tyytyväisyys sekä kiinteistön houkuttelevuus markkinoilla. Kiinteistön energiankulutukseen on kuitenkin viime vuosina pyritty vaikuttamaan aiempaa enemmän, ja kiinteistöön onkin tehty vuosien 2015–2016 aikana lukuisia energiatehokkuustoimenpiteitä, joiden myötä muun muassa kiinteistön talotekniikka modernisoitiin energiatehokkaam-

maksi. Tämä työ täydentää jo tehtyjä päätelmiä, mutta erona aiempaan, työssä keskitytään taloteknisten ratkaisuiden sijaan laajempiin energiaratkaisukokonaisuuksiin.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Työn pää tavoitteena on antaa tukea ja tuottaa ideoita kiinteistön omistajalle rakennuksen energiaratkaisuita koskevaan päätöksentekoon. Työn tärkein tarkastelunäkökulma on energiaratkaisuiden vaikutus kiinteistön imagon parantamiseen ja sen vaikutus kiinteistön käyttöasteeseen, mihin myös ehdotetut energiaratkaisut tulevat osittain perustumaan. Lisäksi työssä tarkastellaan energiaratkaisuita teknis-taloudellisesta näkökulmasta, jotta kiinteistön omistajan mahdollisesti toteuttamat vaihtoehdot ovat teknisesti mahdollisia sekä kohtuullisen kustannustehokkaita. Työn päätuotoksena saadaan valittujen energiaratkaisujen vertailu eri näkökulmista monikriteerimallia hyödyntämällä. Monikriteerimalli tuottaa informaatiota eri vaihtoehtojen hyväksyttävyydestä sekä tarkastelunäkökulmien painotuksien vaikutuksista lopputulokseen.

Ennen kiinteistön energiaratkaisujen tarkempaa tarkastelua työssä analysoidaan kiinteistön tämän hetken sähkönkulutusta. Kiinteistössä ei tällä hetkellä ole tarkempaa käyttäjäkohtaista mittarointia, joten energiankulutuslukemat perustuvat osittain arvioihin sekä laskentaan. Tarkoituksena on saada kartoitettua kiinteistön energiakulutuksen jakauma, joka toimii eräänä lähtötietona kiinteistön energiaratkaisujen määrittämiselle. Lisäksi sähkönkulutuksen analyysin perusteella voidaan havaita mahdollisia epäkohtia, jotka korjaamalla saavutetaan säästöjä kiinteistön energiankulutuksessa.

Työssä keskitytään toimistorakennuksen houkuttelevuutta lisäävistä vaihtoehdoista ainoastaan energiankulutusta pienentäviin ratkaisuihin. Lisäksi talotekniikan energiatehokkuustoimenpiteet rajataan pääosin pois tästä työstä, koska talotekniikkaan liittyviä parannuksia tehtiin merkittävästi jo vuosina 2015–2016. Energiaratkaisuiden osalta työssä keskitytään niihin, jotka ovat teknistaloudellisesta näkökulmasta mahdollista toteuttaa tämän vuosikymmenen aikana. Tämän vuoksi työstä rajataan pois sellaiset vaihtoehdot, jotka eivät ole kohteen kannalta realistisia tulevan vuosikymmenen aikana.

Työn keskeisimmät tutkimusongelmat voidaan esittää seuraavien kysymysten avulla:

- Mitkä energiaratkaisut ovat teknis-taloudellisesta näkökulmasta soveltuvimmat tutkittavaan kiinteistöön?
- Millä energiaratkaisuilla voidaan saavuttaa positiivisin vaikutus kiinteistön houkuttelevuuteen vuokramarkkinoilla, ja sitä kautta kasvattaa kiinteistön käyttöastetta?
- Miten näitä erilaisia parametreja voidaan vertailla järkevästi keskenään, jotta löydetään kiinteistön omistajalle kokonaisuuden kannalta parhaat energiaratkaisut?

1.3 Tutkimusmenetelmät

Työssä suoritetaan kirjallisuuskatsaus, jossa perehdytään sekä hajautetun energiantuotannon ratkaisuihin että tulevaisuuden energiatrendeihin, minkä perusteella kiinteistölle rajataan teknis-taloudellisesti soveltuvimmat energiaratkaisut tarkempaa tarkastelua varten. Tutkittavan kohteen lähtötietojen selvittämiseksi työssä hyödynnetään muun muassa asiantuntijahaastatteluita. Energiaratkaisujen laskennassa hyödynnetään tarkempia simulointiohjelmiä energiantuotannon arvioimiseksi, kuten Earth Energy Designer maa-lämpöohjelmaa sekä dynaamista laskentatyökalua IDA ICE 4.7. Jotta saadaan informaati-

tiota koskien eri energiaratkaisujen houkuttelevuutta vuokramarkkinoilla, arvojen määrittämisessä hyödynnetään asiantuntijapaneelia.

Soveltuvimpia energiaratkaisuja määritettäessä hyödynnetään stokastista monikriteeriarvostusanalyysia (SMAA). Työkaluna käytetään Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun professori Risto Lahdelman SMAA-työkalua.

1.4 Työn rakenne

Luvussa 2 käsitellään lähitulevaisuuden energiatrendejä ja tuotetaan informaatiota energiaratkaisuihin liittyvän päätöksenteon tueksi. Luvussa 3 esitellään työn tutkimuskohteenä oleva toimistorakennus, jonka jälkeisessä luvussa 4 analysoidaan kohteen nykyistä energiankulutusta. Luvussa 5 esitellään yleisesti hajautettuun tuotantoon sopivia energiaratkaisuita kirjallisuuskatsauksen muodossa. Lisäksi kappaleessa perusteellaan, soveltuvatko vaihtoehdot kohteeseen. Luvussa 6 perehdytään kiinteistönomistajan näkökulmaan ja toimistokiinteistöjen kilpailukykyyn markkinoilla. Luvun 5 kohteeseen parhaiten soveltuvista vaihtoehdoista tehdään tarkemmat tarkastelut luvussa 7. Luvussa 8 esitellään työssä käytettävä monikriteerimalli sekä sen avulla saatavat tulokset eri tarkasteluvaihtoehtojen hyväksyttävyydestä. Luvussa 9 esitetään työn johtopäätökset ja työ päättyy kappaleen 10 yhteenvetoon.

2 Tulevaisuuden energiatrendit

Energiamarkkinoiden sekä nykyisten ja kehittyvien energiateknologioiden trendeillä on tässä työssä merkittävä painoarvo, koska työn tavoitteena on ehdottaa kiinteistönomistajalle imagoa uudistavia sekä teknis-taloudellisesti toteutettavissa olevia energiaratkaisuja. Energiatrendit vaikuttavat ehdotettujen energiaratkaisujen valintaan, sillä investointia energiaratkaisuun ei välttämättä tehdä heti. Siksi on tärkeää huomioida myös kypsyydessä olevat potentiaaliset teknologiat, jotka voivat lähivuosina ohittaa kustannustehokkuudessa nykyiset teknologiat. On myös tärkeää arvioida rakennuksen energiaratkaisuiden kustannustehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden, kuten sähkön markkinahinnan, kehitystä yhdessä energiamarkkinoiden trendien kanssa. Lisäksi suuren uutuusarvon omaavat energiatrendit vaikuttavat omalta osaltaan myös ihmisten mielikuviin, mikä on kiinteistön markkinoinnin kannalta hyvin oleellista.

2.1 Ohjauskeinojen vaikutus

Pariisissa 12. joulukuuta 2015 pidetyssä YK:n ilmastokokouksessa sovittiin uudesta ilmastosopimuksesta, jonka päätavoitteena on pysäyttää maapallon keskilämpötilan nousu 1,5 asteeseen. Sopimus ei velvoita osapuolia määrällisiin päästövähennyksiin, mutta ilmastotavoitteen toteutumisen mahdollistamiseksi sopimusten osapuolten on tahoiltansa määriteltävä kansalliset päästötavoitteensa sekä sitouduttava niiden tiedottamiseen, ylläpitämiseen ja saavuttamiseen. Sopimuksen toisena tavoitteena on saavuttaa kasvihuonekaasupäästöjen huippu mahdollisimman aikaisin, jotta kasvihuonekaasupäästöjen määrä päättyisi lasku-uralle ja päästöt sekä päästönierut olisivat tasapainossa keskenään vuosisadan loppupuoliskolla. Pariisin ilmastosopimuksen voimaantulokynnys ylittyi 5.10.2016, kun voimaantuloon vaadittava minimivaatimus (55 osapuolta, joiden osuus globaaleista kasvihuonepäästöistä on vähintään 55 %) toteutui. Suomi ratifioi sopimuksen 14.11.2016. (Ympäristöministeriö 2016a) EU on sitoutunut sopimuksessa vähentämään sisäisesti päästöjään vähintään 40 prosentilla vuoteen 2030 mennessä. Päästöjen vähentäminen edellyttää merkittäviä ohjauskeinoja, joiden vaikutuksena myös sähkön hinta tulee kallistumaan. (Pöyry Management Consulting 2016)

Nykyisen Juha Sipilän hallitusohjelman mukaan EU:n ilmastopolitiikan mukaiset uusiutuvan energian tavoitteet vuodelle 2030 pyritään pääosin saavuttamaan lisäämällä bioenergian käyttöä kivihiilen sekä maakaasun tilalla. Tämä voi osaltaan nostaa sähköenergian sekä kaukolämmön hintaa, joiden pääpolttoaineena monissa yhteistuotantolaitoksissa on yhä kivihiihi sekä maakaasu. (Pöyry Management Consulting 2016) Toisaalta pyrkimällä päästövähennystavoitteisiin bioenergian avulla, tulee huomioida EU:ssa tekeillä oleva laki, joka sellaisenaan toteutuessaan vaikuttaa metsien hakkuun päästövaiikutusten laskentaan. Suomen mukaan hakkuiden ansiosta nuori metsä sitoo itseensä enemmän hiilidioksidia vanhaan verrattuna, kun taas EU:n lakiesityksen näkemyksessä huomioidaan ainoastaan vähentykö metsäpinta-ala vai ei. (Stenroos 2016)

2.1.1 Päästökauppa

Vuonna 2005 aloitettu Euroopan unionin päästökauppa on keskeinen kasvihuonekaasujen vähentämisen ohjauskeino, joka voi vaikuttaa merkittävästi sähkön hintatasoon myös Suomessa. Päästökaupan keskeinen ajatus on toteuttaa päästövähennyksiä mahdollisimman kustannustehokkaasti. EU:n päästökaupan piiriin lukeutuvat tällä hetkellä hiilidioksidipäästöt, alumiinin tuotannon perfluorihilipäästöt sekä kemianteollisuuden typpioksiduulipäästöt. EU:n komissio jakaa eri jäsenvaltioille tietyn määrän päästöoikeuksia, jotka jaetaan eteenpäin jäsenvaltioiden päästökauppaviranomaisten toimesta energiantuottajille sekä päästökaupan piiriin kuuluvalle teollisuudelle. Suomessa pääs-

tökauppalupia sekä päästökaupparekisteriä hallinnoi Energiavirasto. Toimialakohtaisten päästöjen on pysyttävä ennalta määritetyn kokonaispäästömäärien rajoissa ja tämän mahdollistamiseksi toimijat voivat käydä päästöoikeuksista huutokauppaa. Päästökauppalupaansa vähemmän päästöjä tuottavat toimijat voivat huutokaupassa myydä ylimääräisiä päästöoikeuksiaan enemmän päästöjä tuottaville toimijoille. Tällöin systeemitasolla päästövähentymä toteutuu siellä, missä se on kustannustehokkainta. (Energiavirasto 2016). Johtuen osittain vuonna 2008 alkaneesta globaalista talouden taantumasta, sekä EU:n asettamista jäsenvaltiokohtaisista uusiutuvan energian tavoitteista, päästöoikeuksien hinta on kuitenkin romahtanut, minkä vuoksi päästökauppa on tällä hetkellä varsin tehoton ohjauskeino. (Viljainen ym. 2015) Päästöoikeuksien hinta tippui pelkästään vuodesta 2008 tasolta 30 € tasolle 5 € päästötonnia kohden vuoteen 2013 mennessä (Koch 2014). Talouden taantuma heikentää teollisuusyritysten tuotteiden kysyntää, jolloin yritykset vähentävät tuotantomääriään. Tämä vaikuttaa suoraan yritysten tuottamiin päästömääriin, jolloin myös päästöoikeuksien kysyntä laskee, mikä madaltaa niiden hintatasoa markkinoilla. Jäsenvaltiokohtaiset uusiutuvan energian tavoitteet taas ovat painostaneet jäsenvaltioita tukemaan uusiutuvaa energiaa esimerkiksi investointituilla, jolloin uusiutuvan energiantuotannon lisääntyessä päästövapaan tuotannon määrä lisääntyy. Tämä vähentää päästöoikeuksien kysyntää edelleen, jolloin myös päästöoikeuksien markkinahinta tippuu alemmaksi. (Viljainen ym. 2015)

Päästöoikeuksien matala hinta on osittain mahdollistanut myös tämän hetken sähkön matalan markkinahinnan. Esimerkiksi hiilellä tuotettu energia on tällöin edullisempaa, kun päästöoikeuksien osuus tuotantokustannuksista on pienempi. (Viljainen ym. 2015) Tulevaisuudessa EU:n tavoitteena on rajoittaa vahvemmin päästöoikeuksien määrää, mikä nostaa päästöoikeuksien hintaa ja sitä kautta myös sähkön hintaa. EU:n komissio on julistanut vuosille 2021–2030 sijoittuvan päästökaupan neljännen vaiheen, jossa päästöoikeuksien määrää vähennetään vuotuisesti 2,2 % nykyiseen 1,74 % vähennykseen verrattuna. Lisäksi EU pyrkii estämään hiilivuodon aiempaa tehokkaammin. (Euroopan komissio 2016a) Hiilivuodossa yritykset siirtävät tuotantoaan EU:n päästökaupan rajaamalta alueelta muihin maihin, jolloin globaali hiilitase pysyy ennallaan. (Euroopan komissio 2016b) Vastatoimenpiteenä EU tulee muun muassa jakamaan enemmän ilmaisia päästöoikeuksia niille toimialoille, joissa on suurin riski siirtää toiminta EU:n ulkopuolisiin maihin. (Euroopan komissio 2016a)

2.1.2 Uusiutuvan energian tuet

Energiamarkkinoiden kehitykseen vaikuttaa merkittävästi myös energiatukien kehitys. Uusiutuvan energian kansallisia tukia on kritisoitu päästökaupan ohjausvaikutuksen heikentämisen lisäksi siitä, että ne ovat tutkimusten mukaan varsin kalliita kuluttajille sekä pienille ja keskisuurille tukipolitiikan ulkopuolelle jääville yrityksille. Toisaalta uusiutuvan energian tuet ovat kansallisesti varsin nopea keino pyrkiä EU:n ilmastotavoitteisiin. Lisäksi osa maista perustelee niiden hyödyntämistä energiaomavaraisuuden lisäämisellä, etenkin vuoden 2014 Ukrainan kriisin jälkeen. Tukien tarkoituksena on myös edesauttaa kehittyviä vähäpäästöisiä teknologioita kasvattamaan markkinoitaan, jotta niihin investoiminen tulevaisuudessa olisi kustannustehokasta myös ilman tukia. (Viljainen ym. 2015)

Suomessa tuetaan tällä hetkellä Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM:in) toimesta yritysten sekä julkisten toimijoiden erilaisia uusiutuvan energian investointeja (kuva 1). (TEM 2016) Nämä tuet voivat kuitenkin vaihdella vuosittain ja hallituskausittain merkittävästi, mikä voi heikentää suunniteltujen hankkeiden kustannustehokkuutta. Energia-alan toimijat hyötyisivät eniten pitkäjänteisestä ja ennustettavissa olevasta energia-

politiikasta, jolloin myös hieman riskipitoisempiin uusiutuvan energian hankkeisiin uskallettaisiin investoida pidemmällä aikavälillä. (Halme ym. 2014)

Uusiutuvan energian investoinnit vuonna 2016 (tavanomainen teknologia):

| | |
|---------------------------------------|---------|
| Lämpökeskushankkeet (puupolttoaineet) | 10–15 % |
| Lämpöpumppuhankkeet | 15 %* |
| Aurinkolämpöhankkeet | 20 % |
| Pienvesivoimahankkeet | 15–20 % |
| Kaatopaikkakaasuhankkeet | 15–20 % |
| Aurinkosähköhankkeet | 25 % |
| Biokaasuhankkeet | 20–30 % |
| Pientuulivoimahankkeet | 20–25 % |

* Pois lukien jäte- ja hukkalämmön hyötykäyttöön liittyvät hankkeet, joihin sovelletaan energiansäästöön liittyviä tukiprosentteja.

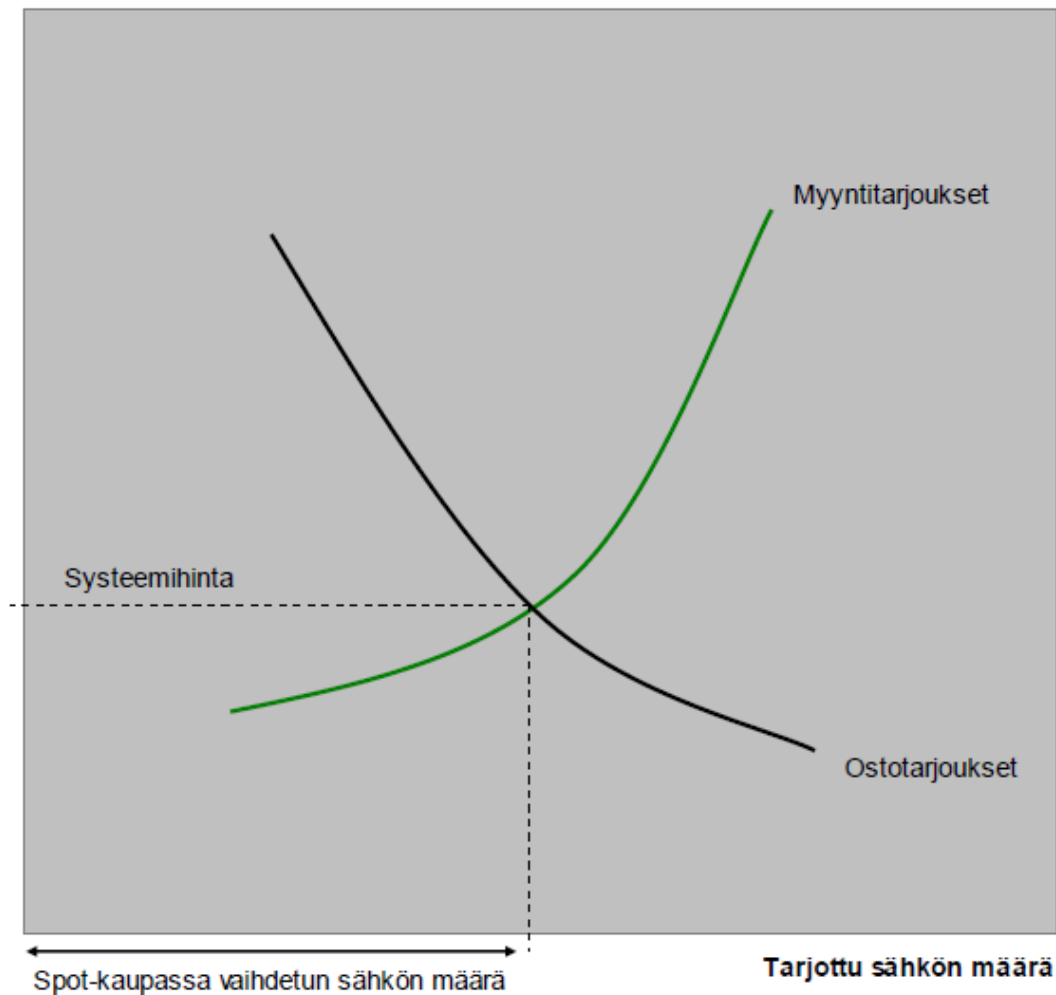
Kuva 1. Uusiutuvan energian investointitukiprosentit Suomessa (TEM 2016).

2.2 Sähkön hinnan muodostuminen Suomessa

Suomi kuuluu Pohjoismaiden ja Baltian sähköpörssi Nord Pool:iin, joka on avoin ja keskitetty markkinapaikka, jossa myydään sähköenergiaa markkinahintaan. Sähköenergian hinta määräytyy markkinoilla kysynnän ja tarjonnan tasapainopisteestä. Sähköpörssissä tarjoukset yhdistetään yhdeksi osto- ja yhdeksi myyntikäyräksi, minkä perusteella jokaiselle tunnille määritellään kysynnän ja tarjonnan tasapainopiste. Tasapainopisteen hintaa kutsutaan systeemihinnaksi, mikä on sama kaikille markkinaosapuolille. Pohjoismaiset sähkömarkkinat muodostuvat Suomesta, Ruotsista, Norjasta, Virosta sekä Tanskasta. Sähkön hintaan vaikuttavat useat erilaiset tekijät niin kysyntä kuin tarjontapuolella, kuten esimerkiksi talous- ja markkinaolosuhteet, vallitsevat sääolosuhteet tai rajalliset sähkön siirtomahdollisuudet. Pohjoismaissa sähköstä tuotetaan normaaliolosuhteissa noin puolet vesivoimalla, mistä johtuen Suomen sähkön hintaan eniten vaikuttava yksittäinen tekijä on Norjan sekä Ruotsi vesitilanne. (Elinkeinoelämän keskusliitto 2012)

Sähköpörssin ensisijainen kaupankäynti tapahtuu Elspot-markkinoilla, jossa käydään kauppaa fyysisestä sähkötoimituksesta seuraavalle päivälle. Tarjousten viimeinen jättöaika on toimitusta edeltävänä päivänä klo. 12.00. Sähkön hinta määräytyy huutokaupassa seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. (Nord Pool 2016a) Lisäksi riippuen vallitsevasta siirtokapasiteetista, sähkön hinta voi vaihdella markkina-alueittain. Norja on jakautunut viiteen, Tanska kahteen ja Ruotsi neljään markkina-alueeseen. Suomi, Viro, Latvia ja Liettua muodostavat kukin oman markkina-alueensa. Kuvassa 2 on esitetty sähkön hinnan määräytyminen Elspot-markkinoilla kysynnän ja tarjonnan mukaan. (Elinkeinoelämän keskusliitto 2012)

Hinta

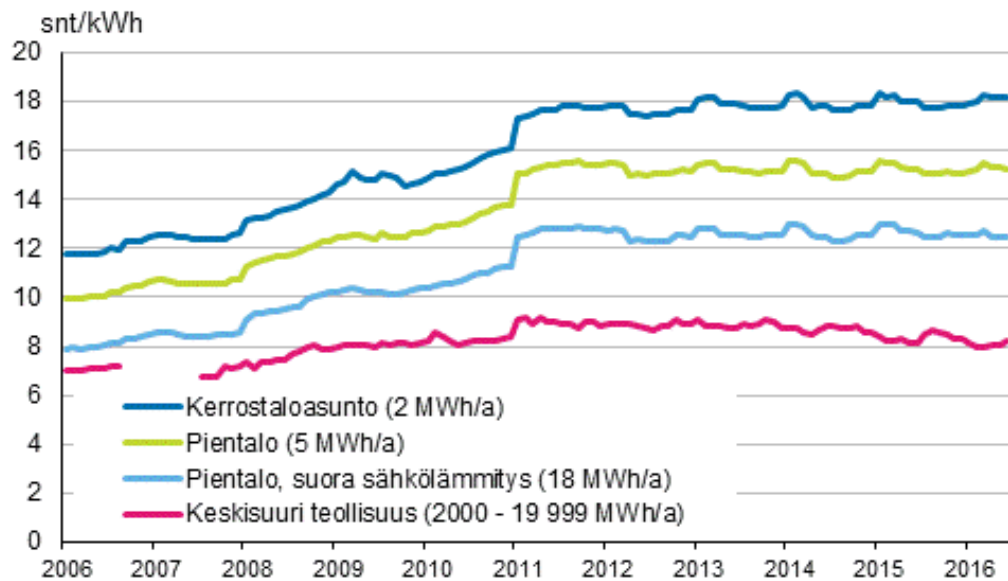


Kuva 2. Sähkön hinnan ja volyymin määräytyminen Elspot-markkinoilla. (Elinkeinoelämän keskusliitto 2012)

Elbas-markkinoilla sen sijaan toteutuu vuorokauden sisäinen jälkimarkkina Elspot-kaupalle. Elbas-markkinoilla käydään kauppaa yhden megawattitunnin kiinteästä sähkön toimituksesta tunneille, joille on jo määräytynyt Elspot-hinta. Kaupankäynti tapahtuu ajallisesti lähempänä sähkön fyysistä toimitusta ja se sulkeutuu tuntia ennen toimitustuntia. Sähköenergian todellinen kysyntä ja tarjonta kohtaavat tästä johtuen Elbas-markkinoilla usein tarkemmin kuin Elspot-markkinoilla. Elbas-markkinoiden merkitys on kasvamassa tulevana vuosina johtuen uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön määrän lisääntymisestä. Erityisesti tuulivoiman kohdalla jälkimarkkinat tarjoavat hyvän vaihtoehdon Elspot-markkinoille, sillä tuulivoiman tuotto on epätasaista ja usein vaikeasti ennustettavissa. (Nord Pool 2016b)

Suomalaisien kuluttajille lopulliseen sähkön hintaan vaikuttaa kuitenkin myös sähkönmyyjän ottama korvaus pörssisähkön hinnan päälle, sähkön siirtomaksut sekä verot. Suomessa sähkön kokonaishinta on pysynyt vuosien 2011–2016 välillä melko samalla tasolla, kuten kuvasta 3 nähdään. (Tilastokeskus 2016) Pöyry Oy:n tekemässä selvityksessä (Pöyry Oy 2016) arvioitiin sähkön hinnan nousevan tulevaisuudessa merkittävästi nykyiseen tasoon verrattuna sellaisessa skenaariossa, jossa päästökauppa toimii ainoana ohjauskeinona. Toisessa skenaariossa päästövähennystavoitteisiin pyritäisiin nykyisillä kansallisilla tukijärjestelmillä, jolloin sähkön hinta olisi Suomessa ensimmäistä skenaariota matalampi. Uusiutuvan energian osuus sähköntuotannossa ennustetaan olevan kor-

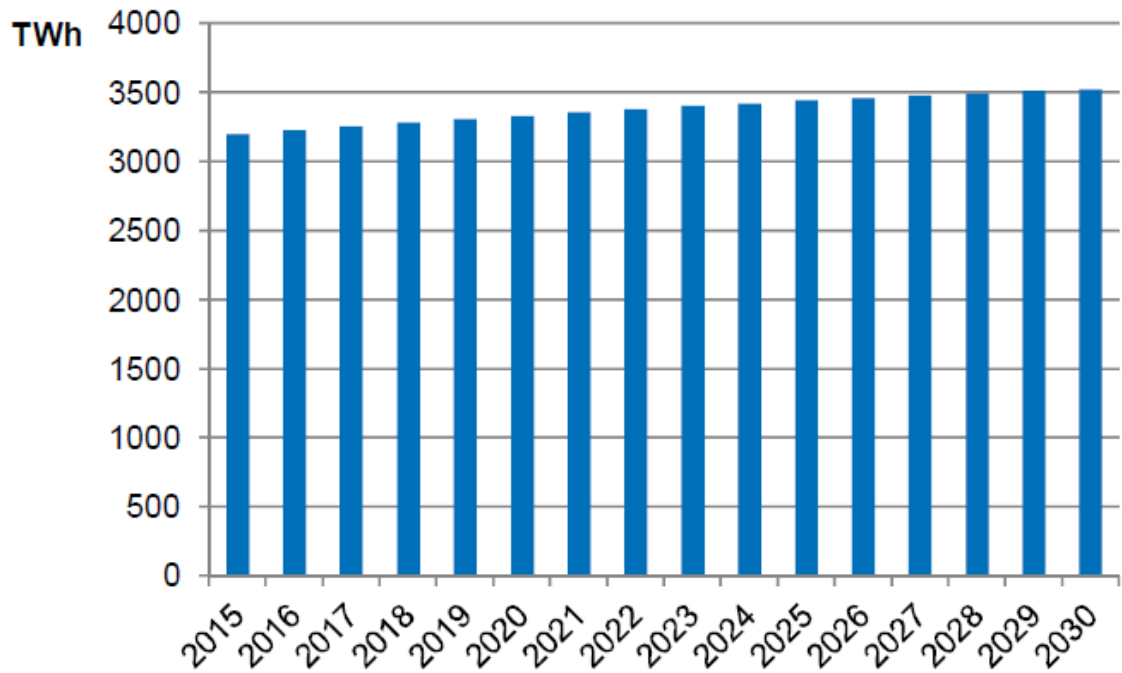
keammalla tasolla skenaariossa, jossa päästökauppa toimii ainoana ohjauskeinona. (Pöyry Oy 2016)



Kuva 3. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin (Tilastokeskus 2016).

2.3 Sähkön hintakehityksen taustatekijät

Nykyinen öljyn maailmanmarkkinahinnan ennätysellisen matala hintataso vaikuttaa myös muiden fossiilisten energiavarojen maailmanmarkkinahintaan. Osittain tästä johtuen sähkön hintakehitys on ollut varsin maltillista, hintatason ollessa ajoittain jopa matala. Öljyn hinnan ennustetaan kuitenkin nousevan yli 80 \$/barreli aikavälille 2015–2020, mikä osaltaan tulee myös nostamaan sähkön hintatasoa lähitulevaisuudessa. (Pöyry Management Consulting 2016). Kuvassa 4 on esitetty sähkönkulutuksen ennustettu varsin maltillinen kasvu EU:ssa vuosina 2015–2030. Myös Suomessa sähkönkulutus kasvaa suhteellisesti lähes samalla tasolla EU:n kokonaiskulutuksen kanssa. (Pöyry Management Consulting 2016). Sähkön kysynnän kasvu nostaa omalta osaltaan sähkön hintaa, mikäli tarjonnan oletetaan säilyvän samalla tasolla.



Kuva 4. Sähkön kokonaiskulutuksen kasvu EU:ssa (Pöyry Management Consulting 2016).

Sähköenergian markkinahintaa alentaa osaltaan tuotantoprosessien tehostuminen sekä tuotantoteknologian kehittyminen eri sähköntuotantomuotojen osalta. Lisäksi kasvava uusiutuvan energian tuotantomäärä lisää vaihteluita sähkön hintaan, kun esimerkiksi aurinkoisina ja tuulisina päivinä energiaa on reilusti tarjolla, jolloin hinta putoaa ylitarjonnan seurauksena hetkellisesti hyvin voimakkaasti. Pöyryn tutkimuksen (2016) mukaan uusiutuvan energian tuotantokustannus tulee tippumaan tulevaisuudessa ja fossiilisten energialähteiden tuotantokustannus tulee nousemaan. (Pöyry Management Consulting 2016)

Tulevaisuudessa sähköenergian kokonaishinta Suomessa tulee todennäköisesti lähivuosikymmenien aikana nousemaan, sillä fossiilisten energiavarojen hinnannousun lisäksi myös uusiutuvan energian tukeminen siirtyy kuluttajan maksamaan sähkön hintaan verojen muodossa. Sähkön hintataso on kuitenkin vielä tällä hetkellä Suomessa varsin edullinen moniin muihin EU:n jäsenmaihiin verrattuna. (Eurostat 2016) Uusiutuvan energian tuotantomäärien suuret vaihtelut aiheuttavat myös sähköverkostolle merkittäviä paineita, joihin pitää pystyä varautumaan tarvittavilla investoinneilla. Investointien johdosta sähkön kokonaishinta tulee todennäköisesti kasvamaan tulevaisuudessa, kun sähköverkon kunnostuksesta aiheutuvat kustannukset pyritään pääosin kattamaan kuluttajien maksamilla siirtomaksuilla. Suomessa sähkömarkkinalaki vaatii sähkönsiirtoyhtiöitä varmistamaan sähkönjakelun toimintavarmuuden, mikä taas vaatii sähköverkkojen omistajilta investointeja sähköverkkojen uudistamiseen ja kunnossapitoon. Esimerkiksi Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid korotti alkuvuodesta 2016 kantaverkkomaksuja keskimäärin 14 prosenttia, mikä aiheutti hinnannostopaineita myös siirtoyhtiöille. Fingrid perusteli korotuksen tarvetta sähkömarkkinoiden kehittymisellä, sähkömarkkinalain uudistumisella sekä vanhojen sähköverkkojen uusimistarpeella. Nämä korotukset näkyvät sähkön kokonaishinnassa myös kuluttajilla. (Taloussanomat 2016a) (Fingrid 2015) Sähkönsiirtoyhtiöt eivät kuitenkaan voi korottaa hintojaan täysin mielivaltaisesti, sillä kilpailu- ja kuluttajavirasto valvoo sähkön hintaa (Energiateollisuus 2016a).

Suomalaisen sähkön hintaan vaikuttaa merkittävästi myös EU-alueen energiapoliittinen kehitys. EU:n eräänä tavoitteena tulevaisuudessa onkin integroida alueensa sähköverkoja yhteen laajemmin muun muassa yhdistämällä Pohjoismaiden sähkömarkkinat Keski-Euroopan markkinoiden kanssa, mikä aiheuttaa epävarmuutta suurista lisäinvestointitarpeista sähköverkkoihin. Toteutuessaan investoinnit taas kasvattavat sähköenergian siirtomaksuja myös Suomessa. Lisäksi muutos nostaa Suomelle nykyään varsin halvan Norjan vesivoimalla tai Tanskan tuulivoimalla tuotetun sähkön markkinahintaa sähkön kysynnän kasvaessa yhteismarkkinoilla nopeammin kuin tarjonnan. Suomen energiamarkkinoihin vaikuttaa osittain myös Venäjän energiapolitiikka. Esimerkiksi Venäjän nostaessa maakaasunsa hintaa merkittävästi, nousee seurauksena myös sähkön hinta Suomessa. Tämä johtuu siitä, että monet suomalaiset voimalaitokset hyödyntävät Venäjältä tuotua maakaasua sähköntuotannossa, jolloin maakaasun hinnannousu välittyy myös kuluttajien hintaan. Lisäksi EU-tason yhtenäisten sähköverkkojen luominen aiheuttaa sähköverkon omistajille investointipaineita, minkä omistajat taas siirtävät sähkön hintaan. Myös tämä lisää omalta osaltaan hajautetun energiantuotannon houkuttelevuutta. Toisaalta laajojen sähkönsiirtoverkkojen tavoite on pyrkiä kokonaisuuden näkökulmasta parempaan kustannustehokkuuteen, kun esimerkiksi aurinkovoiman tuotanto keskittyy Etelä-Eurooppaan aurinkoisille alueille ja tuulivoiman tuotanto tuuliolosuhteitaan parhaimmille paikoille. (Viljainen ym. 2015)

3 Tutkittava kohde - Colosseum

Tässä kappaleessa esitellään työssä tutkittava kiinteistö ja kiinteistön edustajan kautta saadut lähtötiedot kohteesta. Kiinteistö sijaitsee Vantaalla osoitteessa Rajatorpantie 8 A. Tämä Colosseum -niminen rakennus, tontin A-talo, (kuva 5) on valmistunut vuonna 1988 ja se on rakennettu alun perin Imatran Voiman eli nykyisen Fortumin pääkonttoriksi. Colosseumin vieressä sijaitsee Rajatorpantie 8 C-talo, jonka takana sijaitsee tontin D-talo. Colosseumin bruttopinta-ala on noin 56 000 m² ja rakennus lämmitetään pääosin Vantaan Energian kaukolämmöllä ilmanvaihtolämmityksen välityksellä. Rakennus lämpenee osittain myös ikkunoiden alle sijoitettujen sähköpattereiden avulla. Kaukolämmön osuutta kokonaislämmityksestä on pyritty maksimoimaan. Sähkölämmityksellä lähinnä varmistetaan hyvän lämpöviihtyvyyden mukaiset olosuhteet talviaikaan, jolloin sähköpatterit vähentävät ikkunoiden aiheuttamaa kylmäsaiteilyä.



Kuva 5. Rajatorpantie 8 A (ELO 2016).

Kiinteistön vuotuiset energiakustannukset ovat noin 700 000–800 000 €, joten jo muutamien prosenttien energiankulutuksen alenemalla voidaan säästää merkittäviä summia rahaa. Vuotuisista energiakustannuksista noin 70 % aiheutuu sähkönkulutuksesta ja loput 30 % kaukolämmönkulutuksesta. Sähköenergian kokonaishinta kohteessa on noin 90 €/MWh ja kaukolämmön noin 45 €/MWh (0 % alv). Energiankulutuksen tarkempaa tutkimista vaikeuttaa se, että rakennuksessa on yksi sähkön pääliittymä, jonka kautta kulkevat myös kahden viereisen talon sekä parkkiluolan sähköliittymät. Rakennuskohdainen sähkönkulutus saadaan kuitenkin selville alamittausten avulla kuukausitasolla. Rakennuksen tarkempaa sähkönkulutusta tai sähkönkulutuksen jakautumista eri osaluokkien kesken ei kuitenkaan saatu eriteltynä rakennuskohtaisina lukemina, joten tässä työssä ne pyritään arvioimaan laskemalla.

Tutkittavaan rakennukseen on tehty viime vuosien aikana energiatehokkuusprojekti, jossa on pyritty parantamaan rakennuksen energiatehokkuutta ja pienentämään sähkönkulutusta säilyttäen sisäilman laatu vähintään samalla tasolla. Projektin yhteydessä on

arvioitu, että vuotuinen ostoenergiankulutus vähenee jopa noin 4000 MWh, mikä hiili-dioksidipäästöinä vastaa noin 900 tonnin vuotuista alenemista. (ELO 2014) Projektin seurauksena kiinteistön sisä- ja ulkovalaistus on pääosin uusittu LED-valaistukseksi. Lisäksi rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmiä on uusittu merkittävästi. Suuri osa ilmanvaihdon puhaltimista on uusittu kokonaan energiatehokkaampiin malleihin, ja lisäksi rakennukseen on lisätty lähes 300 kappaletta tarpeenmukaisen ilmanvaihdon mahdollistavia moottoroituja vyöhykepeltejä. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon avulla varmistetaan riittävän raikas sisäilma, mutta samalla säästetään ilmanvaihdon puhallinsähkökuluksessa. Lisäksi säästetään lämmitysenergiaa, kun ilmanvaihdon lämpöhäviöt vähentyvät pienempien ilmamäärien seurauksena. Tarpeenmukainen ilmanvaihto toimii tässä rakennuksessa pääosin neuvotteluhuoneissa sekä avokonttoreissa. Yksittäisissä toimitohuoneissa ei tarpeenmukaista ilmanvaihtoa ole, koska saatava hyöty on varsin pieni verrattuna sen tuomiin kustannuksiin. Tällöin yhdellä tarpeenmukaisen ilmanvaihdon mitta-anturilla voidaan vaikuttaa ainoastaan yhteen pieneen toimitohuoneeseen.

Energiatehokkuusprojektin yhteydessä on uusittu myös osa lämmitys-, jäähdytys- ja glykoliverkostojen kiertopumpuista. Uudet pumput ovat merkittävästi aiempia energiatehokkaampia; ne ovat korkean hyötysuhteen kestopumppuja, jotka ovat varustettu taajuusmuuttajilla. Lisäksi suurin osa pumpuista on säädetty virtaamiltaan optimaaliseksi. Energiatehokkuustoimenpiteitä on tehty myös rakennetasolla, ja esimerkiksi suurin osa ikkunoista on tiivistetty lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Tämän seurauksena ikkunoiden alla sijaitsevien sähköpatterien kulutusta on voitu pienentää säilyttäen silti tyydyttävät lämpöviihtyvyyden olosuhteet. Projektin yhteydessä on päivitetty myös kiinteistön rakennusautomaatio, mikä on mahdollistanut tehtyjen energiatehokkuustoimenpiteiden potentiaalien realisoitumisen. Automaatiojärjestelmän päivittäminen nykypäivän vaatimusten tasolle mahdollistaa uusien älykkäiden laitteiden ja järjestelmien optimaalisen toiminnan. Toisaalta esimerkiksi valaistuksen osalta automaatiojärjestelmässä on vielä päivitettävää, jotta valaistus saadaan toimimaan optimaalisesti eikä se ole turhaan päällä.

Rakennuksen lämmöntalteenottolaitteet perustuvat nestekiertoiseen lämmöntalteenottoon (LTO), joka mahdollistaa lämmönsiirron nesteen mukana putkistojen kautta eri sijaintiin kuin lämmönlähteen sijainti. Haittapuolena on kuitenkin putkiston lämpöhäviöistä johtuva heikompi hyötysuhde verrattuna muihin lämmöntalteenottojärjestelmiin. Nestekiertoisen LTO-järjestelmän lämpötilahyötysuhde on yleensä vain noin 45–60 % (Seppänen 2008) (Palonen 2012). Nestekiertoisten LTO-järjestelmien käyttö kohteessa on kuitenkin perusteltua, sillä ilmanvaihtojärjestelmät on sijoitettu rakennukseen hyvin hajautetusti, jolloin joustava nestekiertoinen LTO-järjestelmä on tarpeellinen.

Rakennuksen jäähdytys tehdään vedenjäähdytyskoneilla, jotka viilentävät jäähdytyspiiriin menevän nesteen. Jäähdytyksenjakojärjestelmänä käytetään puhallinkonvektoreita, jotka kierrättävät kylmää ilmaa tilassa. Näiden avulla voidaan toteuttaa jäähdytyksen säätö huonekohtaisesti, jolloin voidaan hyödyntää pienempiä ilmanvaihdon ilmamääriä verrattuna jäähdytykseen ilmanvaihdolla. (Motiva 2012)

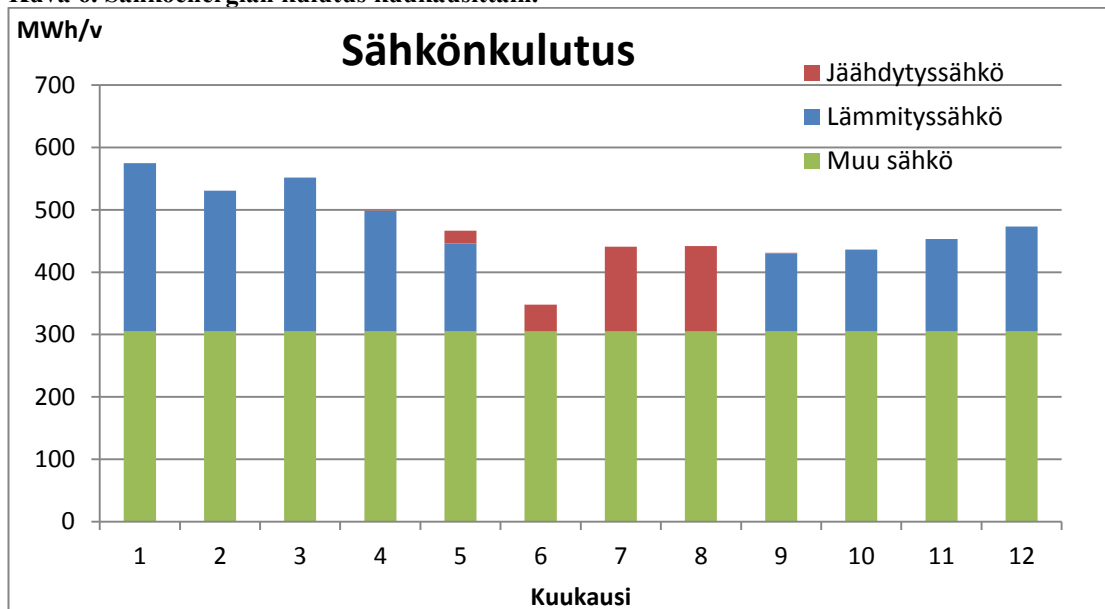
Kiinteistön vajaakäyttöaste on tällä hetkellä noin 19 %. Vajaakäyttöaste tarkoittaa kiinteistön tyhjien vuokraneliöiden määrää suhteessa vuokrattaviin neliöihin. Helsingin kaupungin tutkimuksen mukaan toimitilarakennusten vajaakäyttöaste Vantaalla on syksyllä 2015 ollut noin 20 %, joten Colosseumin arvo on samaa luokkaa verrattuna alueen keskiarvoon. (Helsingin kaupungin tietokeskus 2016)

4 Rakennuksen energiankulutus

Koko kiinteistön sähkön- sekä lämmönkulutus tiedetään kuukausitasolla seurantaohjelman tietojen perusteella. Tarkempaa mittarointia rakennuksessa ei kuitenkaan ole, eikä sähkönkulutusta saada määriteltyä tuntitasolla kuin koko sähkön pääliittymälle, johon kuuluvat tarkasteltavan A-talon lisäksi myös C- ja D-talot sekä parkkiloa. Kuvassa 6 on esitetty rakennuksen kuukausittainen sähkönkulutus vuonna 2015. Kuvan tiedot perustuvat kiinteistön kaikkien rakennusten sähkön yhteisen kokonaiskulutuksen mittarointilukemiin. Tutkittavan rakennuksen kuukausikulutus on määritetty suhteuttamalla tutkittavan rakennuksen vuotuinen sähkönkulutus koko kiinteistön rakennusten sähkönkulutukseen. Kun tästä sähkönkulutuksesta vähennetään pois vielä arvioitu jäähdityksen sähköenergiankulutus, jää jäljelle tutkittavan rakennuksen muu sähköenergiankulutus, joka voidaan olettaa vakioksi per kuukausi. Pääliittymän tuntikohtainen teho tunnetaan, mutta tarkasteltavan rakennuksen osalta tätä tietoa ei ole saatavilla. Pääliittymän pohjakuorma on seurantaohjelman perusteella noin 600 kW ja A-talon osuus koko pääliittymän sähkönkulutuksesta on noin 69 %. Tämän perusteella A-talon pohjakuorman arvioitiin olevan noin 410 kW.

Sähkölämmityksen osuutta arvioidessa tulee huomioida, paljon rakennuksen kuukausittainen sähkön pohjakulutus on ilman sähkölämmityksen ja jäähdityssähkön osuutta. Pienin kuukausittainen sähkönkulutus on kuvan 6 perusteella kesäkuussa, jolloin sähkölämmityksen voidaan olettaa olevan kokonaan poissa päältä. Jäähdityksen sähköenergiankulutus on määritetty vertaamalla sitä muiden toimistorakennusten neliökohtaiseen jäähdityksen energiantarpeeseen. Tämän perusteella jäähdityksen sähköenergian ominaiskulutuksen on arvioitu olevan noin 7 kWh/m². Tämä muu sähköenergian kulutus on arviolta noin 300 MWh kuukaudessa. Tämän tarkastelun perusteella vuotuisen sähkölämmityksen energiankulutuksen voidaan arvioida olevan noin 1 000 MWh. Jäähditykseen sähköä sen sijaan kuluu arviolta noin 560 MWh vuodessa.

Kuva 6. Sähköenergian kulutus kuukausittain.



Rakennuksen sähkön ominaiskulutus rakennustilavuutta kohti on noin 25 kWh/m³ ja kaukolämmön ominaistarve on noin 17 kWh/m³. Suomessa toimistorakennusten sähkön ominaiskulutus on keskimäärin noin 21 kWh/m³. Lämmön ominaiskulutus on keskimäärin toimistorakennuksissa noin 34 kWh/m³. Nämä ominaiskulutukset perustuvat

Motivan tilastoihin, joissa mittaukset kohteisiin ovat suoritettu vuosina 2009–2014. (Motiva 2016a & 2016b) Motivan tilastoissa kohteita ei kuitenkaan ole eritelty iän tai teknisten päätöksien perusteella. Tarkasteltavan rakennuksen sähkön ominaiskulutus on siis suurempi ja lämmön ominaiskulutus vastaavasti pienempi kuin keskiverto toimistorakennuksilla yleensä. Tämä johtuu siitä, että tarkasteltava rakennus lämmitetään kaukolämmön lisäksi osittain myös sähköllä, kun taas merkittävä osa toimistorakennuksista lämpenee lähes kokonaan kaukolämmöllä.

Valaistuksen sähkönkulutus on määritetty laskemalla kohteen valaisintietojen ja pohjapiirustusten perusteella keskimääräinen valaistusteho neliometriä kohti. Tämän jälkeen on arvioitu valaisimien keskimääräinen käyttöaika vuodessa. Rakentamismääräyskoelman D5 perusteella tyypillinen toimistorakennuksen käyttöaika on 2500 tuntia vuodessa. (Ympäristöministeriö 2013a) On kuitenkin tiedossa, että kohteessa valaistuksen ohjaus ei toimi täydellisesti ja esimerkiksi osa valaistuksesta on todennäköisesti jatkuvasti päällä. Tämän perusteella on arvioitu vuotuisen käyttöajan olevan noin 3 500 tuntia, missä oletuksena 10 % valaistuksesta on jatkuvasti päällä ja loput valaistuksesta on vuorokaudessa 11 h päällä. Tämän perusteella valaistuksen energiankulutus on kohteessa noin 1030 MWh vuodessa.

Yksi merkittävin epävarmuutta aiheuttava sähkönkulutuksen osa-alue on käyttäjälaitteiden kulutus. Tämän vuoksi käyttäjäsähkönkulutus on pyritty arvioimaan mahdollisimman tarkasti, jonka takia päävuokralaiselle on lähetetty taulukon 1 mukainen käyttäjälaitteiden sähkönkulutukseen liittyvä kyselylomake. Kyselylomake on tehty Motivan ”Työasemaympäristön sähkönsäästön laskentapohjan” perusteella. (Motiva 2007) Päävuokralaisen vastausten perusteella on pystytty laskemaan arvio käyttäjälaitteiden sähkönkulutuksesta. Tätä käyttäjälaitteiden profiilikulutusta laajennettiin vastaamaan myös muiden vuokralaisten käyttäjälaitteprofiilia. Laskennan perusteella käyttäjälaitteiden vuotuinen sähkönkulutus on noin 380 MWh vuodessa. Mikäli laitteiden sähkönkulutusta leikataan, vähentyy myös niistä aiheutuva hukkalämpö, mikä lisää lämmitystarvetta talviaikaan. Toisaalta kesäaikaan laitteiden sähkönkulutuksen säästön lisäksi säästetään jäähdytyskustannuksissa, kun laitteista aiheutuvaa lämpökuormaa saadaan vähennettyä.

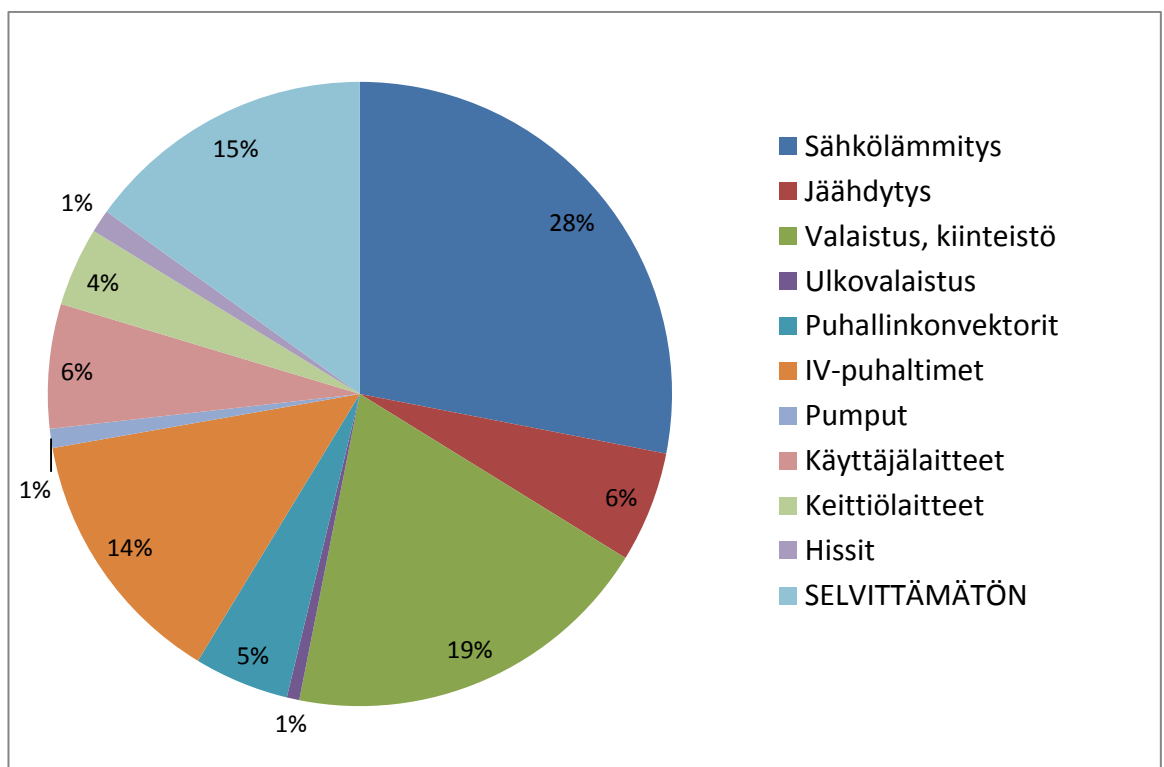
Taulukko 1. Työasemaympäristön sähkönsäästön laskentapohjan käyttäjältä kysytyt lähtötiedot (Motiva 2007).

| Tarkasteltavan organisaation tiedot | Lähtötilanne |
|---|--|
| Työasemamäärä | <input type="checkbox"/> kpl |
| Näyttöjen määrä (oletus: yhtä monta kuin työasemia) | <input type="checkbox"/> kpl |
| Lasertulostimien määrä | <input type="checkbox"/> kpl |
| Kuinka suuri osa em. työasemista on kannettavia | <input type="checkbox"/> kaikista työasemista |
| Kuinka suuri osa näytöistä on LCD-näyttöjä | <input type="checkbox"/> kaikista näytöistä |
| Sähkökäytön perustiedot | |
| Kuinka suurella osalla työasemia on virransäästö käytössä | <input type="checkbox"/> kaikista työasemista |
| Kuinka suurella osalla näytöistä on virransäästö käytössä | <input type="checkbox"/> kaikista näytöistä |
| Kuinka suurella osalla tulostimia on virransäästö optimoitu | <input type="checkbox"/> kaikista tulostimista |
| Virransäästöprofiili (arkipäivisin) | |
| Työasemien aktiivikäyttö päivässä | <input type="checkbox"/> tuntia |
| Yli 15 min taukoja tai kokouksia yhteensä päivässä | <input type="checkbox"/> tuntia |
| Poissa työpaikalta | <input type="checkbox"/> tuntia |
| Aktiivitulostusta työpäivänä | <input type="checkbox"/> tuntia |
| Kuinka suuri osa näytöistä sammutetaan työpäivän jälkeen | <input type="checkbox"/> kaikista näytöistä |
| Kuinka suuri osa työasemista sammutetaan työpäivän jälkeen | <input type="checkbox"/> kaikista työasemista |
| Kuinka suuri osa tulostimista sammutetaan työpäivän jälkeen | <input type="checkbox"/> kaikista tulostimista |

| | |
|---|--------|
| Muut perustiedot | |
| Työpäivän pituus (sisältäen ruokatauon) | tuntia |
| Työpäiviä vuodessa (poislukien arkipyhät & lomat) | päivää |
| => työtunteja vuodessa | tuntia |
| Päiviä vuodessa, jolloin ei työtä | päivää |
| Tunteja yhteensä vuodessa | tuntia |

Toimistorakennuksen ilmanvaihdon keskimääräiseksi ilmamääräksi on arvioitu rakentamismääräyskokoelman D2 ohjearvon perusteella $1,5 \text{ l/s/m}^2$ ja ilmanvaihtokoneiden keskimääräiseksi SFP-luvuksi koneiden asentamisvuoden perusteella $2 \text{ kW/m}^3/\text{s}$ (Ympäristöministeriö (2011a)). Rakennuksen ilmanvaihtokoneiden keskimääräiset käyttöajat on saatu rakennuksen ilmanvaihtokoneiden käyntiaikataulukosta. Näihin arvoihin perustuvien laskelmien perusteella ilmanvaihtokoneiden käyntiaika täysteholla on noin 3 360 h vuodessa, jolloin ilmanvaihtokoneiden sähkönkulutus on noin 800 MWh vuodessa. Ilmanvaihtoa on kuitenkin päivitetty rakennuksessa joidenkin tilojen kohdalla tarpeenmukaiseen ilmanvaihtoon, jolloin näiden tilojen osalta ilmamäärät ovat pienempiä. Tämän osalta arvioitua kulutusta ei kuitenkaan ole lähdetty pienentämään, sillä arvioon on haluttu jättää hieman varmuutta.

Kuvassa 7 on esitetty edellisiin arviointeihin perustuva sähkönkulutuksen jakauma. Kuvasta 7 nähdään, että suurin osa sähkönkulutuksesta aiheutuu sähkölämmityksestä, valaistuksesta sekä ilmanvaihdon puhaltimista.



Kuva 7. Sähkönkulutuksen jakautuminen kiinteistössä.

Todellinen mitattu vuotuinen sähkönkulutus kohteessa on noin 5900 MWh. Kiinteistön laskennalliseksi sähkönkulutukseksi saatiin vain 5000 MWh arvioimalla sähkönkulutuksen eri osa-alueet erikseen, vaikka arvioinnissa on huomioitu mahdollisista pidemmistä käyttöajoista johtuva varmuusvara mukaan. On epäselvää mistä tämä ero johtuu, eikä sitä voida saada selville ilman tarkempaa mittarointia. Ero voi johtua esimerkiksi jonkin laitteen virheellisestä toiminnasta nykyisen mittaroinnin virheellisyydestä. On

myös mahdollista, että laskennassa ei silti ole huomioitu riittävästi varmuutta jonkin osa-alueen suhteen, minkä kulutus onkin todellisuudessa arvioitua suurempi. Esimerkiksi jäähdytyksen sähköenergiantarve voi todellisuudessa vaihdella merkittävästi riippuen esimerkiksi jäähdytyksen asetuslämpötilasta tai säleiden käytöstä. Jäähdytyksen todellisen kulutuksen vaihteluvälin ollessa niin merkittävä, voi se osaltaan selittää laskennallisen ja mittaroidun sähkönkulutuksen jopa 5700 MWh/v asti. Tämä johtuu siitä, että jäähdytyksen sähkönkulutus vaikuttaa osaltaan myös laskennallisen sähkölämmityksen arviointiin.

4.1 Mittarointi

Kohteen sähkönkulutuksen pohjakuorma kuukausitasolla on varsin merkittävä, noin 400 kW. On tärkeää selvittää mistä tämä johtuu, koska suuri pohjakuorma voi aiheutua osittain esimerkiksi jonkin LVI-laitteen virheellisestä ohjauksesta. Esimerkiksi jokin laite saattaa virheellisen ohjauksen vuoksi olla päällä vuorokauden kaikki 24 tuntia, vaikka laitteen käyttöajan kuuluisi olla vain 10 tuntia vuorokaudessa. Tämä lisää turhaan kiinteistön sähkönkulutusta, minkä vuoksi virheellistä ohjausta aiheuttavat automaatiovirheet tulee pyrkiä korjaamaan ensisijaisesti. Toinen vaihtoehto selvittämättömälle sähkönkulutukselle voi olla arvioitua suurempi käyttäjänsähkönkulutus. Esimerkiksi vuokralaisten työasemat saattavat olla päällä jatkuvasti ja niiden tehontarve voi olla arvioitua suurempi. Käyttäjäsähkön suuri kulutuslukema ei kuitenkaan ole kiinteistönomistajalle niin merkityksellinen, koska sähkölasku on osittain jyvitetty karkeasti vuokrapinta-alan mukaan vuokralaisten maksettavaksi. Toisaalta kiinteistönomistaja ei tarkkaan tiedä käyttäjänsähkön osuutta sähkönkulutuksesta, joten jos esimerkiksi käyttäjänsähkönkulutus kasvaa, ei kiinteistönomistaja pysty siirtämään tätä muutosta suoraan vuokralaisen maksettavaksi. Kiinteistönomistaja ei pysty suoraan rajoittamaan vuokralaisten sähkönkulutusta. Kiinteistönomistaja voi lähinnä asentaa vuokralaiskohtaisen mittaroinnin ja uudistaa vuokrasopimukset siten, että vuokralaiset maksavat sähkölaskunsa kulutusperusteisesti. Kohteen suuri sähkönkulutus on tärkeää selvittää, koska tällöin pystytään löytämään myös mahdolliset laitteiden toimintavirheet. Korjaamalla nämä viat, pystytään parantamaan kiinteistön energiatehokkuutta kustannustehokkaasti sekä säästämään kiinteistösähkönkulutuksessa, mikä vähentää kiinteistönomistajan vuotuisia ylläpitokuluja.

Rakennuksen sähkönkulutuksen seuranta olisi vaivatonta, mikäli eri kulutuksen osa-alueet mittaroitaisiin tarkasti. Tällä hetkellä tutkittavassa rakennuksessa ei ole tarkempaa mittarointia, vaan yhden pääsähköliittymän alla on kaikki Rajatorpantie 8:n kolme rakennusta, eli tutkittavan A-talon lisäksi C- ja D-talot sekä myös luolaparkkihalli. Tämä tarkoittaa sitä, että jatkuvia tuntikohtaisia kulutuslukemia saadaan ainoastaan yhdessä näiden kaikkien rakennusten osalta pääliittymän mittarista. Lisäksi C- ja D-taloissa sekä luolaparkkihallissa on omat alamittarit, joista huoltomies pystyy lukemaan käsin jokaisen rakennuksen oman kulutuksen, mitä huoltomiehet tekevät yleensä vähintään kerran kuukaudessa. Mittaroinnin jälkiasentaminen on kuitenkin ongelmallista, koska perinteisellä mittausten menetelmällä se on hyvin monimutkaista ja osittain käytännössä jopa mahdotonta. Perinteisellä sähkönkulutuksen mittauksella tarkoitetaan sitä, että jokaiselle laiteryhmälle tai laitteelle asennetaan oma mittaus. Tämä on varsinkin näin laajassa kiinteistössä hyvin kallis investointi ja lähes mahdotonta toteuttaa kunnolla, koska laitteet ovat rakennuksessa hajallaan eri kytkentäryhmissä. Itse mittarit ovat varsin kalliita ja lisäksi tarvitaan tiedonsiirto niistä keruuyksikköön sekä runsaasti asennustyötä. Tällaisissa tilanteissa yleisesti suositellaankin käytettäväksi osakuormien mittaustekniikkaa, jossa mitataan eri laitteiden kuormituskäyriä, minkä perusteella saadaan sähkönkulutuksen laskennalliset arvot. (Shemeikka ym. 1996) (Motiva 2012)

5 Energiantuotantojärjestelmien kuvaus

5.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelit ovat yleistyneet vilkasta vauhtia yhdeksi suosituimmista pientuotantomuodoista niin maailmalla kuin Suomessakin. Varsinaiset aurinkopaneelit koostuvat aurinkokennoista, jotka ovat useimmiten sarjaan kytkettyjä keskenään. Suuri osa aurinkokennoista muodostuu p- ja n-tyypin puolijohdemateriaaleista. Aurinkokennoon saapuva auringon valo muuttuu sähkövirraksi, kun valo synnyttää jännitteen näiden eri puolijohdetyyppien välillä. Prosessissa osa fotoneista omaa niin suuren energiamäärän, että ne pystyvät tunkeutumaan pintakerroksen läpi pn-liitokseen. Siellä ne muodostavat elektroni-aukkopareja, joista elektronit kulkeutuvat n-puolelle ja aukot p-puolelle. Tämä synnyttää jännite-eron paneelin ylä- ja alapinnan välille. Jännitetaso riippuu muun muassa sarjaan kytkettyjen aurinkopaneelien määrästä ja virta auringon säteilyn voimakkuudesta. Tuotettu sähkö on kuitenkin tasasähköä, joten aurinkopaneelijärjestelmä tarvitsee lisäksi invertterin muuttamaan tasavirran vaihtovirraksi, jotta laitteet pystyvät hyödyntämään aurinkosähköä. Invertterin muunnoksessa tapahtuu kuitenkin häviöitä, joten jos aurinkosähköä käyttävät laitteet pystyvät hyödyntämään tasasähköä, pystytään aurinkoenergiaa hyödyntämään paremmalla kokonaishyötysuhteella. (Mertens 2013) Aurinkopaneelit kytketään yleensä sarjaan, jotta saavutetaan järjestelmän korkeampi jännitetaso. Tämän haittapuolena on järjestelmän herkkyyys varjoille, jolloin yhdelle paneelille lankeava varjostus vaikuttaa negatiivisesti kaikille samaan sarjaan kytketyille paneeleille. Tämän vuoksi on kannattavampaa kytkeä suuria paneelijärjestelmiä osittain sekä sarjaan että rinnan, jotta ehkäistään merkittävämpien tehohäviöiden riski. (Gao 2009 ym.)

Aurinkokennoja on useita eri tyyppisiä, joista yleisimmät teknologialtaan ovat joko yksitai monikiteisiä pii-kennoja. Ohutkalvokennot taas ovat mukautuvia joustavuutensa takia sekä edullisia valmistuskustannuksiltaan, mutta hyötysuhteeltaan vielä heikompia verrattuna perinteisiin pii-kennoihin. (Mertens 2013) Tällä hetkellä kehityksessä ovat väriaineherkistetyt kennot, joita voidaan pinnoittaa esimerkiksi rakennuksen seinämateriaaleihin tai ikkunoihin. (Green 2015 ym.) Kyseisen teknologian kehittyessä aurinkosähkön mukautus rakennuksen arkkitehtuurisen ilmeen kanssa tulee helpottumaan entisestään.

Yleensä kiinteistöjen sähkön pientuotantoon tarkoitettut aurinkopaneelit sijoitetaan rakennusten katolle. Tasakattoasennuksissa paneelit kallistetaan haluttuun kulmaan asennustelineiden avulla, kun taas kaltevan katon rakennuksissa paneelit integroidaan suoraan kattorakenteen päälle hyödyntäen samaa kaltevuuskulmaa katon kanssa. (Prasad ym. 2014) Nykyään on olemassa myös julkisivuihin integroitavia aurinkopaneeleita, joita suomalaisista yrityksistä esimerkiksi Ruukki valmistaa. Näiden etuna on paneelien näkyvyys rakennuksen imagon näkökulmasta, kun paneelit ovat esteettisesti muotoiltu julkisivuun kaikkien nähtäville. (Ruukki 2015) Lisäksi näillä paneeleilla voidaan korvata muita julkisivumateriaaleja ja ne ovat myös suhteellisen huoltovapaita, koska lika ei pääse kerrostumaan pystysuorille paneeleille niin helposti. (Prasad ym. 2014) Toisaalta pystysuoraan asennettavien paneelien kohdalla aurinkosähkön vuotuinen tuotanto on hieman yli 30 % heikempi verrattuna optimaalisesti kallistettuun paneeliin, kun molemmissa tapauksissa paneelit ovat suunnattu kohti etelää. Lisäksi julkisivukennot ovat yleensä ohutkalvoteknologiaa, jonka hyötysuhde on vielä tällä hetkellä matalampi kuin perinteisemmällä monikidekennoilla. (Ympäristöministeriö 2013a) Aurinkopaneelien julkisivuasennus on myös työläämpää ja siksi kalliimpaa verrattuna perinteiseen kattoasennukseen. Varsinkin olemassa oleviin rakennuksiin asentaminen jälkikäteen on myös

hankalaa ja kallista, ellei samalla tehdä suurempaa julkisivuremonttia. Kuvassa 8 on esitetty julkisivun aurinkopaneeliratkaisu korjausrakentamiskohteessa.



Kuva 8. Aurinkopaneeleita julkisivulla Turussa (TS 2016).

Soveltuvuus kohteeseen

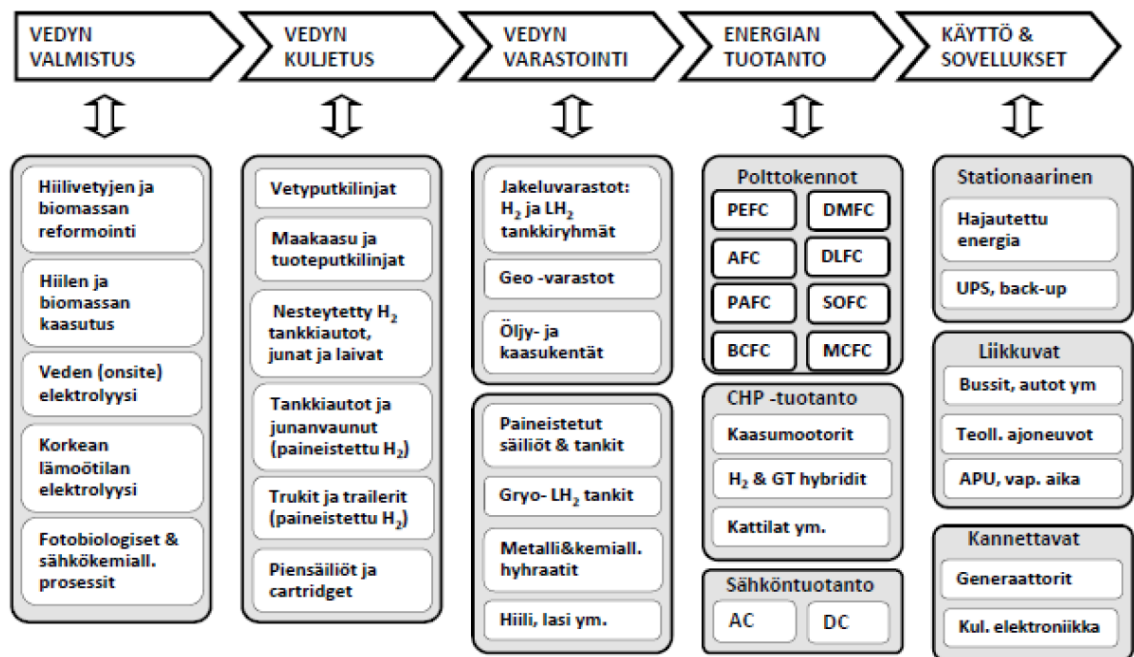
Aurinkosähköjärjestelmä on potentiaalinen energiantuotantojärjestelmä kohteeseen, koska kohteessa on runsaasti kattopintaa, jolle aurinkopaneeleita voidaan asentaa. Lisäksi sähkön pohjakuorma on kohteessa varsin suuri, joten aurinkosähkö pystytään hyödyntämään rakennuksen omaan tarpeeseen, mikä on kustannustehokkuuden kannalta suotuisaa. Lisäksi julkisivuremontin yhteydessä voidaan harkita myös julkisivuihin integroitavia aurinkopaneeleita. Aurinkolämpökeräimet kilpailevat samasta kattopinta-alasta kuin aurinkopaneelit. Kesäaikaan rakennusten lämmöntarve koostuu lämpimän käyttöveden tarpeesta, joka on toimistorakennuksissa kesäaikaan varsin pientä. Lisäksi toimistorakennusten lämpimän käyttöveden tarve on epävarmaa ja vaihtelevaa. Tällöin on riskinä, että aurinkolämmön kaikkea tuotantoa ei pystytä hyödyntämään. Tämän perusteella kohteen kattopinta-ala suositellaan säästettäväksi aurinkopaneelien käyttöön. Kappaleessa 7 tutkitaan tarkemmin aurinkosähköjärjestelmän mitoitus kohteessa.

5.2 Polttokennot

Eräs vaihtoehto sähkön ja lämmön pientuotantoon on polttokennoihin perustuva pien-CHP-voimala. Polttokennossa vedystä muodostuu palamisreaktion myötä suoraan sähköenergiaa. Vedyn lisäksi palamisreaktiossa tarvitaan happea, ja sähköenergian lisäksi lopputuotteena syntyy myös vesihöyryä. Pientuotannossa lupaavin teknologia on tällä hetkellä kiinteäoksidipolttokenno (solid oxide fuel cell, SOFC), jonka toimintalämpötila vaihtelee 800–1000 °C välillä. Polttoaineeksi soveltuvat myös yksinkertaiset hiilivedyt, kuten esimerkiksi metaani. Vedyn tuotantoprosessi on varsin yksinkertainen ja sitä voidaan muodostaa esimerkiksi elektrolyysireaktiolla, jossa vettä hajotetaan vedyksi sekä hapeksi sähköenergian avulla. Haittapuolena on kuitenkin prosessin sähköenergiainten-

siivisyys. Lisäksi vetyä voidaan muodostaa biomassasta kaasutuksen avulla tai hiilivetyjä reformoimalla. (Kauranen 2013 ym.)

Vedyn yksi merkittävimmistä haasteista on kuitenkin sen varastointi. Vetyä voidaan varastoida esimerkiksi paineistamalla se hyvin korkeaan paineeseen, jolloin energiatiheys tilavuutta kohden paranee huomattavasti. Tällöin varastosäiliön tulee olla tarpeeksi kestävä ja tiivis. Vety voidaan varastoida myös jäähdyttämällä se -253 asteiseksi, jolloin se muuttuu helpommin varastoivaan nestemäiseen muotoon. Jäähdytykseen vaaditaan kuitenkin merkittävä määrä energiaa ja käytännössä varastoitavaa vetyä tulee jäähdyttää jatkuvasti. (Motiva 2016c) Kuvassa 8 on esitetty vedyn elinkaaren mahdolliset eri vaiheet.



Kuva 9. Vety energiantuotannossa (Jumppanen 2009)

Polttokennojen etuna ovat pienet elinkaarenaikaiset päästöt. Itse käytön aikana ei synny ollenkaan kasvihuonekaasupäästöjä tai muita haitallisia päästöjä, kuten pienhiukkaspäästöjä. Lisäksi polttokennojen etuna on keskimäärin korkea hyötysuhde varsinkin sähköntuotannon suhteen. (VTT 2015b) Polttokennon elinkaarenaikainen ekologisuus riippuu laitteiden valmistuksen lisäksi myös siitä miten hyödynnettävä polttoaine on valmistettu, kuljetettu, varastoitu. Lisäksi ympäristöystävällisyys riippuu polttokennon hyötysuhteesta, jolla se muuttaa vetyä sähköksi. (Jumppanen 2009)

Vuonna 2016 VTT ja Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu tekivät investointipäätöksen laitoksesta, jossa aurinkosähköllä tuotetaan vetyä. Jos tämä pilottilaitos osoittautuu käyttökelpoiseksi, voi se tarkoittaa murrosta myös polttokennojen polttoaineen saatavuuteen. Tosin aurinkosähkö-vety-laitoksen investointikustannukset ovat varmasti korkeat. Toisaalta aurinkosähkön yleistyessä sekä uusiutuvan energian tuotannon ajallisen vaihtelun ongelman kasvaessa, vedyn tuottaminen varastoon aurinkosähköllä voi olla tulevaisuudessa jopa kustannustehokas vaihtoehto, mikäli muussa tapauksessa tuotettua aurinkosähköä ei saada järkevästi käytettyä tai varastoitua muulla tapaa. Toisena vaihtoehtona on rakentaa tämänkaltaisen laitoksen tuulivoimalan lähelle, jolloin voimalan suurimman tuoton aikaan tuotettu sähkö voidaan hyödyntää vedyn tuotantoprosessissa. Tästä huolimatta tämänkaltaiset laitokset todennäköisesti edesauttaisivat vedyn saata-

vuotta lähinnä paikallisesti, sillä varastointi ja sitä kautta jakelu pidemmille etäisyyksille olisi edelleen ongelmana. (VTT 2016)

Polttokennot ovat silti yleistyneet viime vuosina hajautetussa energiantuotannossa. Globaalit markkinat ovat selvästi kasvussa, ja esimerkiksi vuoteen 2016 mennessä Japaniin oli asennettu hajautetussa tuotannossa hyödynnettäviä polttokennoja jo 170 000 kappaletta. (Tekes 2016) Japanin tavoite on nostaa tämä määrä miljoonaan vuoteen 2020 mennessä. Japanin ohella polttokennoja on myyty aiempaa enemmän Saksaan (Kauppa-lehti 2015). Tämä johtuu pääosin siitä, että näissä kahdessa maassa polttokennojen käyttöönottoa on tuettu valtion toimesta (Pesola 2014 ym.).

Suomalainen yritys Convion on eriytynyt omaksi yritykseen Wärtsilän polttokennosastosta, ja se on tällä hetkellä markkinajohtaja 50–300 kW:n teholuokan järjestelmissä, jotka soveltuvat kooltaan hyvin hajautettuun energiantuotantoon. Kyseinen teho tarkoittaa järjestelmän tuottamaa sähkötehoa, mutta lisäksi oheistuotteena syntyy lämpöä. Yritys toimittaa ensimmäiset polttokennotilaukset asiakkaille vuonna 2016 (VTT 2015a). Monet muut polttokennoyritykset keskittyvät lähinnä pieniin alle 5 kW mikro-CHP järjestelmiin tai suuriin yli 300 kW järjestelmiin. Convionin kokoluokan polttokennot sopivat varsinkin kerrostalojen, muiden kiinteistöjen sekä teollisuuslaitosten tarpeisiin. Convionin järjestelmän etu lukuisiin muihin markkinoilla oleviin järjestelmiin verrattuna on sen joustavuus polttoaineen suhteen, sillä se toimii vedyn lisäksi myös perinteisemmillä polttoaineilla kuten bio- ja maakaasulla sekä dieselillä. (VTT 2015a)

Tällä hetkellä kaupallisten polttokennojärjestelmien kustannukset ovat vielä varsin korkealla tasolla. Asennettuina kustannukset vaihtelevat noin 7 000 €/kW ja 43 000 €/kW välillä. (Buonomano ym. 2015) Korkea hintataso johtuu muun muassa polttokennojen tarvitsemien katalyyttien, jotka ovat yleensä kalliita metalleja kuten platinaa, hintatasosta. (Motiva 2016d) Polttokennojen hinta on kuitenkin viime vuosien kuluessa tippunut selvästi ja investointikustannusten läpimurron ennustetaan tapahtuvan lähivuosina. Hinnan on arvioitu tippuvan 90 % vuoden 2010 hintatasosta vuoteen 2020 mennessä. Vuoden 2020 kustannustason ennustetaan vielä tippuvan lähes puoleen vuoteen 2050 mennessä. Hintapudotusten syiksi perustellaan materiaalien käytön kustannustehokkuuden kasvamista, skaalatuotannon tuomia kustannushyötyjä sekä erilaisia innovaatioita niin suunnittelussa kuin tuotantoteknologiassa. (Ihonen 2012 ym.)

Vaikka polttokennojen investointikustannusten odotetaan pienentyvän radikaalisti jo seuraavan vuosikymmenen aikana, tulee vedyn keskimääräinen hinta edelleen pysymään varsin korkealla tasolla. Tosin mikäli vedyn käyttökohteen lähellä sijaitsee tehdas, jonka prosesseissa syntyy sivutuotteena vetyä, voi sitä saada paikallisesti hyvin edullisestikin. Kuten yleensä pientuotantojärjestelmien kohdalla, myös polttokennojen osalta lopullinen kilpailukyky markkinoilla riippuu kilpailevien tuotantotapojen kustannustason kehityksestä. (Ihonen 2012 ym.)

Soveltuvuus kohteeseen

Tässä työssä ei perehdytä polttokennojärjestelmiin tarkempien laskelmien osalta, koska tällä hetkellä tekniikka on vielä osittain kehitysvaiheessa ja tämän sukupolven järjestelmien investointikustannukset ovat niin merkittävät. Lisäksi polttoaineen jakelun ja varastoinnin infrastruktuuri on osittain edelleen kehitysvaiheessa.

5.3 Lämpöpumput

Lämpöpumpun toiminta perustuu käänteiseen Carnotin kiertoprosessiin, missä lämpötilaero luodaan tekemällä tietty määrä työtä. (Lampinen 2011). Lämpöpumpun lämmitysprosessissa otetaan lämpöä matalan lämpötilan lähteestä ja puristetaan se kompressorin sähkötehon avulla korkeampaan lämpötilaan. Näitä lähteitä voivat olla esimerkiksi maaperä, josta lämpöä voidaan ottaa joko pintamaasta vaakaputkistolla tai syvemmältä kallioperästä pystysuuntaisella porakaivolla. Lisäksi lämmönlähteenä voidaan käyttää ulkoilmaa tai vesistöjä, kuten merta tai järveä. Eräs vaihtoehto on hyödyntää myös hukkalämpöä, kuten esimerkiksi rakennuksen viemäreihin virtaavaa jätevettä tai ilmanvaihdon poistoilman lämpöä. (Juvonen ym. 2013)

Lämmönkeruuneste, esimerkiksi vesi-etanoliliuos, pumpataan kiertopumpuilla kiertämään lämmönkeruupiiriin keräämään lämpöenergiaa. Tämän jälkeen lämmennyt keruuneste saapuu lämpöpumpun höyrystimeen, jossa se luovuttaa lämpöä höyrystimen toisessa kiertopiirissä olevalle kylmäaineelle, joka höyrystyy lämmitessään. Höyrystetty kylmäaine siirtyy lämpöpumpun kompressoriin puristettavaksi, jolloin sen lämpötila nousee. Tämän jälkeen lämmitetty höyry ajetaan lauhduttimeen, jossa se lauhtuu ja luovuttaa lämpönsä eteenpäin lämmönjakopiiriin. Monesti lämpö siirretään vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään, joka luovuttaa lämpöä rakennukseen kiertämällä radiaattoreiden läpi. Lauhtunut kylmäaine on siis kondensoitunut takaisin nesteeksi, jossa se ajetaan takaisin höyrystimeen vastaanottamaan uudestaan lämpöä. (Juvonen ym. 2013)

Soveltuvuus kohteeseen

Tässä työssä tarkempien tarkasteluiden osalta keskitytään maalämpöpumppuihin, jossa energiaa kerätään kallioperästä syvien porakaivojen avulla. Pintamaa lämmönlähteenä ei sovellu kohteeseen, sillä kohteen suuri lämmitysenergiantarve vaatisi hyvin laajan tilantarpeen tontilta, jolle vaakakeruuputkistoja asennettaisiin. Syvillä porakaivoilla pystytään siis tuottamaan enemmän lämpöenergiaa suhteessa tontin pinta-alaan. Vesistöjä ei ole tarpeeksi lähellä kohdetta, jotta niiden hyödyntäminen lämmönlähteenä olisi teknis-taloudellisesta näkökulmasta järkevää. Myöskään jäteveden lämmöntalteenotolla ei saataisi kohteessa merkittävää hyötyä, sillä toimistorakennuksissa lämpimän käyttöveden kulutus on varsin pientä. Ilma-ilmaalämpöpumput eivät sovellu näin suureen kohteeseen päälämmitysjärjestelmäksi varsinkaan pohjoisella ilmastolla, sillä ne ovat tarkoitettu lähinnä lisälämmityslaitteiksi. (Motiva 2008) Ilmavesilämpöpumput eivät ole järkevä ratkaisu kohteeseen, sillä olemassa olevan kaukolämpöjärjestelmän vaihtaminen ilma-vesilämpöpumppuihin ei ole kustannustehokasta. Ilmavesilämpöpumpun vuosilämpökerroin on noin 2, kun lämmönjakojärjestelmänä on ilmalämmitys. (Motiva 2015a) Tällöin lämmitysenergian kustannus ei eroa merkittävästi kaukolämmön kustannuksesta, joten investointi olemassa olevan kaukolämpöjärjestelmän rinnalle ei ole kustannustehokasta. Poistoilmalämpöpumput eivät sovellu kohteeseen, sillä lämmöntalteenotolla otetaan jo talteen poistoilman lämpöä ja lisäksi lämmöntalteenoton jälkeen jäävää ylijäämälämpöä käytetään autohallin lämmittämiseen.

5.4 Bioenergian hyödyntäminen

Bioenergia tarkoittaa biomassasta eli eloperäisestä aineesta kuten esimerkiksi puista, kasveista tai jopa osittain jätteistä saatua energiaa. Biomassaa voidaan käyttää hajauteissa energiantuotannossa joko sellaisenaan tai vaihtoehtoisesti se voidaan ensin jalostaa esimerkiksi nestemäiseksi tai kaasumaiseksi polttoaineeksi loppukäyttöä varten. Tarkasteltavan kiinteistön lämmitysenergiantarve voidaan periaatteessa hoitaa myös biolämmityskattiloilla kauko- tai maalämmön sijaan. Käytännössä polttoaineena käytetään joko pellettejä tai haketta. Näiden lämpöarvo on kuitenkin varsin heikko verrattuna

esim. öljyyn, minkä vuoksi biolämmitysjärjestelmät vaativat suuren tilantarpeen polttoainevaraston takia. Polttoainevaraston edellytyksenä on säilyttää polttoaine kuivassa tilassa, sillä polttoaineen kostuminen aiheuttaa järjestelmän hyötysuhteen heikkenemistä. (Vihanninjoki 2015) Biolämmitysjärjestelmän toiminta vaatii myös jatkuvaa seurantaa. Esimerkiksi laitteiden puhtaustaso vaikuttaa merkittävästi niiden hyötysuhteeseen.

Soveltuvuus kohteeseen

Koska tarkasteltava rakennus sijaitsee vilkkaalla kaupunkialueella, aiheuttaa bioenergian käyttö näin suuressa kohteessa merkittävästi lisää paikallisliikennettä polttoainekuljetusten vuoksi tai vaihtoehtoisesti erittäin laajat polttoainevarastot. Lisäksi tutkimusten mukaan esimerkiksi maalämpö on usein selvästi kustannustehokkaampi vaihtoehto. (Kurnitski 2011 ym.) Korjausrakentamisessa tämän mittakaavan biolämmityksen toteuttaminen on haastavaa, koska sen vaatima suuri tilantarve on yleensä hankalaa toteuttaa jälkikäteen. (Holopainen ym. 2007) Näiden syiden takia biolämmityskattilat ovat tässä työssä rajattu tarkemman tarkastelun ulkopuolelle.

5.5 Pientuulivoima

Eräs vaihtoehto sähkön pientuotantoon on pientuulivoimala. Pientuulivoimalaksi määritellään tuulivoimala, jonka potkurin pinta-ala on alle 200 m². Tuulivoimaloita on useita eri tyyppisiä, joista yleisin on vaaka-akselinen potkurivoimala. Tuulivoimalla tuotettu energia on verrannollinen roottorin pyyhkäisypinta-alaan, joten saman kustannusluokan vaaka-akselinen voimala kattaa huomattavasti suuremman pyyhkäisypinta-alan verrattuna pysty-akseliseen voimalaan. Tämän vuoksi vaaka-akselinen voimala on yleensä voimalatyypeistä kustannustehokkain. Pysty-akselisella voimalalla on kuitenkin etunsa, sillä ne pystyvät pyörimään jo varsin pienillä tuulennopeuksilla sekä myös turbulentsissa olosuhteissa. Tämän vuoksi ne soveltuvat hyvin taajama-alueille, jossa viereiset rakennukset aiheuttavat tuulen turbulentsisuutta voimalan hyödyntämään tuulen, varsinkin koska pientuulivoimassa voimalan korkeus on varsin matala verrattuna suurempiin tuulivoimaloihin. Lisäksi pystyakselisessa voimalassa ei tarvita erillistä tuulen suuntausmekanismia, vaan se toimii ilman tätä mekanismiakin tuulen suunnasta riippumatta. (Eklund 2011)

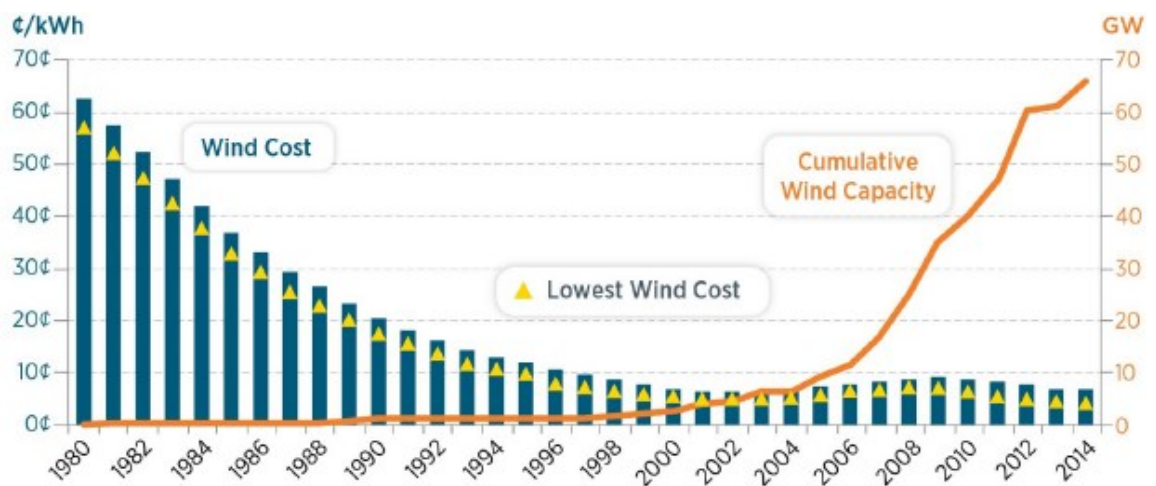
Vaaka-akseliset voimalat on suunniteltu toimimaan tietyillä ennalta määrätyillä tuulennopeuksilla. Ne vaativat yleensä korkeamman tuulen nopeuden käynnistyäkseen verrattuna pysty-akselisiin voimaloihin ja hyvin suurilla tuulennopeuksilla, tyypillisesti noin 25 m/s, vaaka-akselinen voimala on pysäytettävä laitevaurioiden ehkäisemiseksi. Vaaka-akselisilla voimaloilla saadaan kuitenkin hyvissä tuuliolosuhteissa huomattavasti suurempi tuotto pystyakselisiin voimaloihin verrattuna. Taajama-alueiden tyypillisiä ongelmia ovat kuitenkin vaihtelevat tuuliolosuhteet, minkä vuoksi heikomman nimellistehon pystyakseliset voimalat voivat olla jopa parempi ratkaisu tietyillä alueilla kiinteistökohtaiseen tuulivoiman pientuotantoon. (Eklund 2011) Esimerkiksi Viikin ympäristötalon katolle on asennettu pystyakselisiä tuulivoimaloita (Kuva 9). Tuuliolosuhteiden vaihtelevuuden lisäksi pientuulivoiman tuotantoa hankaloittavat taajama-alueilla heikot tuuliolosuhteet. Lisäksi pientuulivoima edellyttää monesti mahdollisimman korkeaa sijoituspaikkaa rakennuksen katolla, jolloin järjestelmän kokoa rajoittaa oleellisesti kattorakenteiden kestävyys. Tällöin pientuulivoimalla saatava tuotto on yleensä varsin pientä verrattuna rakennuksen sähköenergiankulutukseen. Esimeriksi nämä kolme Viikin pystyakselista tuulivoimalaa (Kuva 10) kattavat pyöriessään Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen johtavan tiedottajan mukaan vain lähinnä muutaman energiasäästölamppun sähköenergiankulutuksen verran. (Virtanen 2012)



Kuva 10. Viikin ympäristötalon pysty akseliset tuuliturbiinit. (Virtanen 2012)

Soveltuvuus kohteeseen

Vaikka pientuulivoimateknologia onkin jo varsin kehittynyttä teknologiaa, sen taloudellinen kilpailukyky on heikko verkkosähköön verrattuna. Pientuulivoimateknologian osalta merkittävää hinnanpudotusta, joka johtaisi teknologian yleistymiseen, ei myöskään ole odotettavissa lähitulevaisuudessa. (Pesola 2014 ym.) Kun tuulivoimateknologian viimeisen vuosikymmenen hinnan kehitystä verrataan aurinkosähköteknologian hintakehitykseen, niin huomataan, että aurinkosähkön investointikustannukset ovat tällä ajanjaksolla tippuneet vuosina 2006–2015 noin neljäsosaan. Pientuulivoiman investointikustannukset sen sijaan ovat pysyneet lähes samalla tasolla näiden vuosien aikana, kuten kuvasta 11 nähdään. (U.S. Department of Energy 2015)



Kuva 11. Tuulivoiman kustannusten kehitys suhteessa tuotantomäärien kehitykseen. (U.S. Department of Energy 2015)

Koska aurinkopaneelit ovat tällä hetkellä joka tapauksessa kustannustehokkaampi ratkaisu, niin kohteeseen suositellaan asennettavaksi mieluummin niitä pientuulivoimalan sijaan. Varsinkin kun huomioidaan, että kohde on aurinkosähkön kannalta varsin potentiaalinen asennuspaikka kun kohde sijaitsee Etelä-Suomessa ja paneelit voidaan suunnata etelää kohti. Lisäksi kattopinta-alaa varjostumatonta kattopinta-alaa on kohteessa

varsin paljon. Pientuulivoiman tuotantopotentiaali tarkastellussa kohteessa on varsin heikko, sillä ympäröivät rakennukset aiheuttavat tuulen turbulenttisuutta. Turbulenttisuus tarkoittaa tuulen pyörteisyyttä, ja turbulenttisilla alueilla tuulivoimalan vuotuinen tuotanto on heikompi.

Toisaalta pientuulivoimaloiden etuna on niiden näkyvyys imagomielessä. Kun katoille asennettavat aurinkopaneelit eivät välttämättä näy kadulle asti, niin pientuulivoimala rakennuksen katolla taas näkyy yleensä kauas. Tämän vuoksi kiinteistöä olisi pientuulivoiman avulla helppo markkinoida näkyvästi uusiutuvan pientuotannon käyttäjänä. Toisaalta tämä voi myös kääntyä ratkaisua vastaan, jos voimala asennetaan tuuliolosuhteiden näkökulmasta heikolle sijainnille. Esimerkiksi vaikka tuulivoimala asennetaan näytävälle paikalle kiinteistön katolle, mutta huonojen tuuliolosuhteiden vuoksi voimalan potkuri pyörii vain harvoin, voi pientuulivoimala energiantuotantoratkaisuna tällöin näyttää imagonäkökulmasta huonolta ratkaisulta. Heikkojen tuuliolosuhteiden ja heikon kustannustehokkuuden vuoksi pientuulivoiman osalta ei tässä työssä tehdä tarkempia tarkasteluita. Lisäksi tuulivoimalan sijoituspaikka on ongelmallinen, sillä kattorakenteet eivät todennäköisesti kestä kovin suurta tuulivoimalaa.

6 Kiinteistötalouden näkökulma

Kiinteistön omistajan kannalta vajaakäyttöaste on hyvin ongelmallista, koska se on suoraan verrannollinen kiinteistön tuottoon. Tämän vuoksi kiinteistönomistaja pyrkii varmistamaan vuokralaisten pysyvyyden toimitilassa sekä maksimoimaan vuokrattavien tilojen käyttöasteen. Kumpaankin näistä vaikuttaa merkittävästi vuokralaisten asiakasyytyvyys, joka on monen tekijän summa. Käytännössä kiinteistönomistaja voi kasvattaa nykyisten asiakkaiden tyytyväisyyttä sekä potentiaalisten asiakkaiden kiinnostusta erilaisten investointien avulla. Kiinteistönomistaja on monesti valmis investoimaan suuriakin summia, jos investointien arvioidaan nostavan kiinteistön käyttöastetta. Energiankulutusta vähentävät investoinnit ovat yksi esimerkki tällaisista ratkaisuista.

Energia ratkaisuja tarkasteltaessa on huomioitava niiden mahdollinen vuokralaista haittaava vaikutus. Esimerkiksi suuremmat kunnostustoimenpiteet kannattaa yleensä toteuttaa vasta kiinteistön ollessa muutenkin jo lähes tyhjillään, esimerkiksi muiden pakollisten laajojen remonttien vuoksi. Toinen tärkeä näkökulma on toimenpiteiden vaikutus sisäilmaston laatuun. Esimerkiksi painottamalla liikaa energiatehokkuutta saatetaan heikentää tilojen sisäilmaston laatua. Sisäilmastoon liittyvät ongelmat ovatkin olleet viime aikoina paljon esillä julkisessa keskustelussa, ja eduskunnan tarkastusvaliokunnan mukaan sisäilmaongelmien vuotuiset kustannukset ovat jopa 450 miljoonaa euroa vuodessa. (Suomen hallitus 2014) Toimitilojen käyttökustannusten minimoimisen lisäksi vuokralaisille on tärkeää optimaalinen työskentely-ympäristö, jossa sisäilmatekijät eivät millään tavalla heikennä työntekijöiden tuottavuutta. Hyvän sisäilmaston seurauksena vuokralaiset ovat tyytyväisempiä, jolloin taas toimitilan omistaja hyötyy pidemmistä vuokrasopimuksista sekä suuremmasta kiinteistön käyttöasteesta. Esimerkiksi jäähdytyksen osalta voidaan säästää huomattavasti energiaa, mikäli lämpimimpinä kesäpäivinä sallitaan sisälämpötilan muutaman asteen nousu aiempaan verrattuna. Kuitenkin sopiva sisäilmasto on hyvin tärkeää työn tuottavuuden, ja täten vuokralaisten kannalta, joten sisäilmaston viihtyvyyttä tulee priorisoida. Tässä tapauksessa siis kiinteistötekniikan tärkeimpänä tehtävänä on ylläpitää sopivia sisäolosuhteita, mutta tämä kuitenkin tulee toteuttaa mahdollisimman energiatehokkaasti sisäilmaston laadusta kuitenkin tinkimättä. (Christersson ym. 2015)

Kiinteistöinvestoinneille asetetaan usein tiukat takaisinmaksuaikojen vaatimukset. Takaisinmaksuajan lisäksi ratkaisuvaihtoehtoja arvioidessa oleellista on myös huomioida, mitä välillistä lisäarvoa investointien avulla voidaan saavuttaa. Esimerkiksi kiinteistön sisäympäristön laatua voidaan parantaa eri investointien avulla, vaikka kannattavuutta ei voidakaan suoraan laskea perinteisen rahavirta-analyysin avulla. Sisäympäristön laadun kohentaminen tuottaa kuitenkin lisäarvoa sekä suorasti että epäsuorasti. Suoralla lisäarvolla tarkoitetaan tässä tapauksessa lisäarvoa, joka toteutuu investoinnin kannattavuuden kautta. Epäsuora lisäarvo taas esimerkiksi parantaa kiinteistön imagoa tai lujittaa vuokralaissuhdetta, jolloin välillisesti kiinteistön kannattavuus voi nousta. Esimerkiksi aurinkopaneelijärjestelmän kohdalla alun investointikustannus on melko suuri, eikä investointi monissa tapauksissa maksa itseään takaisin 15 vuoden aikana. Suorana lisäarvona voidaan pitää esimerkiksi alentuneita verkkosähkön vuotuisia kustannuksia. Epäsuora lisäarvo sen sijaan ilmenee kiinteistön imagon parantumisena, mikä taas voi vaikuttaa positiivisesti kiinteistön käyttöasteeseen. Tämä taas parantaa kiinteistön kannattavuutta kiinteistönomistajan näkökulmasta. Epäsuoran lisäarvon arvioiminen on kuitenkin haasteellista verrattuna investoinnin tuoman suoran lisäarvon tarkasteluun. (Christersson ym. 2015) Kiinteistötaito Peltola & Co Oy:n tekemän tutkimuksen mukaan esimerkiksi energiatehokkuuden parantuminen voi nostaa kiinteistön arvoa 5–7

prosenttia, kun energiakustannuksista leikataan energiaratkaisuiden myötä noin 20 %. Esimerkkitapauksena tutkimuksessa käytettiin 10 000 m² toimistorakennusta. (Green Building Council Finland 2011)

Tällä hetkellä Suomen pääkaupunkiseudun kiinteistömarkkinoilla ja varsinkin toimitilamarkkinoilla vallitsee selvä ylitarjonta vuokratiloista. Monet toimistorakennuksia käyttävät yritykset pyrkivät karsimaan kustannuksia tehostamalla tilankäyttöään, jolloin he hakeutuvat monesti uusiin monitilaratkaisuihin tarjoaviin tiloihin vanhojen koppikonttoritoimistojen sijaan. Kiinteistönomistajat harvoin kilpailevat keskenään vuokralaisista vuokratason laskemisella, vaan alalla panostetaan usein enemmän vuokralaisille lisäarvoa tuoviin remontteihin tai vapaakuukausiin vuokrauksessa. (Hernberg 2014) Yhä tulevaisuudessa vahvistuvia trendejä kiinteistötaloudessa ovat muun muassa yritys vastuun korostuminen, energiatehokkuuden tärkeys sekä tilojen täsmämarkkinoinnin merkitys. Lisäksi entistä useammin vuokrasuhteiden kestot jäävät aiempaa lyhyemmiksi. (Christersson ym. 2015)

Tutkimuksen mukaan (Eerikäinen ym. 2013) ympäristöystävällisiä kiinteistöjä ei osata markkinoida asiakkaille Suomessa kovin tehokkaasti. Yritysvastuu kiinteistöalalla keskittyy varsinkin ympäristönäkökulmiin, joten kiinteistöjen energiaratkaisut ovat keskeinen osa yritysvastuuta. Lähes kaikkien suuryritysten strategioihin kuuluu nykyään kestävä kehityksen strategia. Kestävällä kehityksellä tarkoitetaan tasapainoista muutosta, joka huomioi kestävyuden niin ekologisesta, taloudellisesta kuin sosiaalisestakin näkökulmasta. (Ympäristöministeriö 2016b) Siihen pohjautuvan strategian syynä on yleensä yrityksen imago, jota kohentamalla kestävä kehitys mukaisella toiminnalla yritys pyrkii saamaan kilpailuetua markkinoilla. Kestävän kehityksen mukaisella strategialla pyritään myös osittain hallitsemaan nousevia energiakustannuksia, esimerkiksi investoimalla hajautettuun energiantuotantoon.

6.1 Vihreiden rakennusten markkinointi

Markkinoiden ollessa vähänkään painottuneita kestäväan kehitykseen, korostuu hyvin laadittu ja toteutettu tehokas vihreän markkinoinnin strategia. Vihreällä markkinoinnilla tarkoitetaan markkinointia tuotteen ympäristöystävällisiä hyötyjä korostaen. Mitä hyötyä vuokralainen sitten saa vihreistä rakennuksista? Ensinnäkin vuokralaisten tulee onnistua hyödyntämään vihreiden rakennusten potentiaali. Potentiaali jää hyödyntämättä, jos vuokralainen ei sulautu vihreissä rakennuksissa työskentelyä osaksi yrityksen strategiaa. Tällöin vuokralaisen tulee myös onnistua markkinoimaan tätä kestävä kehityksen mukaista strategiaa, jonka yhtenä osa-alueena on liiketoiminta vihreitä tiloja hyödyntäen. Vihreiden kiinteistöjen kysynnän kasvaessa hyötyy myös kiinteistönomistaja panostamalla vihreiden kiinteistöjen tarjontaan. Tällöin kiinteistönomistaja pystyy tarjoamaan asiakkailleen tarpeenmukaiset tilat. Tämän vuoksi kiinteistönomistajan tulee panostaa vihreiden kiinteistöjen markkinointiin, jotta potentiaaliset asiakkaat kiinnostuisivat rakennuksesta, koska uskovat saavansa vihreämmällä arvomaailmalla lisäarvoa omalle toiminnalleen. Tutkimusten perusteella asiakkaat ovat lojaalimpia sellaisia yrityksiä kohtaan, jotka toimivat kestävä kehityksen mukaisesti. Vihreiden arvojen huomiointi kiinteistön markkinoissa edesauttaa kiinteistönomistajaa säilyttämään vuokrasuhteet pidempään, mikä parantaa taloudellista tuottoa kiinteistön käyttöasteen säilyessä pidempään korkeana. (Eerikäinen ym. 2013)

Vihreän kiinteistön markkinointiin pätevät hyvin samankaltaiset peruseriaatteen kuin tavalliseen markkinointiin. Aluksi tulee tunnistaa markkinoilta eri asiakasryhmät, jotka omaavat toisistaan eroavat tarpeet. Tämän jälkeen näistä asiakasryhmistä valitaan ne,

joihin markkinointia halutaan kohdentaa tarkemmin. Seuraavaksi määritellään oman vihreän kiinteistön asema markkinoilla sekä kiinteistön suhde muihin markkinoilla oleviin kilpailijoihin. Analyysin tarkoituksena on havainnollistaa, miten oma kiinteistö eroaa muista kilpailijoiden kiinteistöistä positiivisella tavalla. Kun halutaan erottua muista kilpailijoista, on vihreiden kiinteistöjen markkinointistrategiassa erittäin tärkeää huomioida mielikuviin perustuva emotionaalinen, eli tunteisiin vetoava asemointi pelkän toiminnallisen asemoinnin sijaan. Toisaalta tutkimusten mukaan ei tule kuitenkaan luottaa pelkkään emotionaaliseen asemointiin, vaan tukea sitä myös faktoihin perustuvan toiminnallisen asemoinnin avulla. (Eerikäinen ym. 2013)

Kiinteistömarkkinoilla kilpaillaan yleensä sijainnin, laadun ja hinnan avulla. Kun tarkastellaan jo olemassa olevaa rakennusta, jonka sijaintia ei siis voida muuttaa, jäävät kilpailutekijöiksi lähinnä hinta ja laatu. Vihreiden rakennusten markkinahinta on yleensä muihin rakennuksiin verrattuna korkeampi johtuen korkeammista rakennuskustannuksista, jotka taas voivat aiheutua esimerkiksi uusiutuvan energian tuotantojärjestelmien investointikustannuksista. Siksi onkin tärkeää markkinoida kiinteistön vihreyttä tehokkaasti, jotta markkinoinnista saadaan enemmän lisäarvoa kuin mitä siitä aiheutuu lisäkustannuksia. (Eerikäinen ym. 2013)

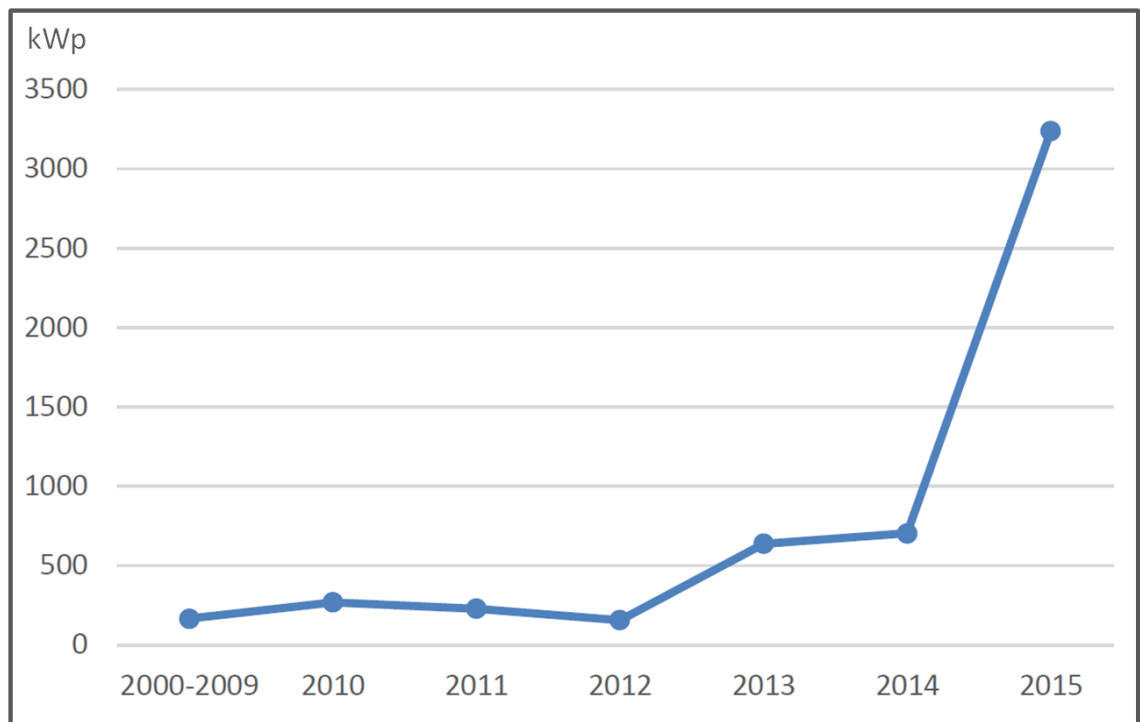
Eerikäisen tutkimuksessa (Eerikäinen ym. 2013) tuodaan ilmi, että markkinoijalla tulee olla konkreettisia todisteita kestävän kehityksen mukaisesta rakennuksesta, josta esimerkkinä tutkimuksessa annetaan vihreä sertifikaatti. Kiinteistön vihreyttä voidaan mahdollisesti markkinoida myös vielä konkreettisemmin, kuin pelkällä vihreällä sertifikaatilla. Jotta tämä onnistuu, tulee näiden ratkaisujen olla imagoltaan hyvin vihreitä ja huomiota herättäviä. Tämän vuoksi ratkaisujen tulee myös näkyä jotenkin potentiaalisille asiakkaille. Esimerkiksi julkisivulle asennettavat aurinkopaneelit ovat hyvin näkyvä ratkaisu, joka on myös konkreettinen todiste kestävän kehityksen mukaisesta toiminnasta kiinteistössä. Toisaalta esimerkiksi pumppujen uusiminen energiatehokkaammiksi vähentää sähkönkulutusta, mutta toimenpide ei näy suoraan ulospäin. Välillisesti pumppujen uusiminen näkyy pienemmän energiankulutuksen seurauksena alentuneina käyttökustannuksina, mitä on kuitenkin hankala markkinoida potentiaalisille vuokralaisille. Eräs tapa todistaa kiinteistön energiainvestointien myötä saavutettava parempi energiatehokkuus näkyvämmiin energiatodistuksen päivittäminen korjaustoimenpiteiden myötä. Lisäksi kiinteistölle voidaan tavoitella ympäristösertifikaattia. (Eerikäinen 2013 ym.) Toisaalta ympäristösertifikaattien tarkoituksena on usein ohjata uudisrakennuskohteen suunnittelua, joten olemassa olevien rakennuksien osalta vaikutusmahdollisuuksia ei luonnollisestikaan ole niin merkittävästi. Toisaalta esimerkiksi yhdysvaltalaisen LEED-ympäristösertifikaattien osalta olemassa oleville rakennuksille on oma pisteytysjärjestelmänsä. (Green Building Council Finland 2015) Kestävän kehityksen näkökulmasta onkin järkevää, että myös olemassa olevat rakennukset voivat hakea omilla kriteereillä ympäristösertifikaatteja, koska merkittävä osa kasvihuonekaasupäästöistä muodostuu olemassa olevista hieman vanhemmista rakennuksista. Tämän vuoksi on ympäristönkin näkökulmasta järkevämpää kehittää näiden rakennusten energiatehokkuutta, kuin raivata ne pois ja rakentaa uusia tilalle, mistä aiheutuu huomattava määrä kasvihuonekaasupäästöjä. Tämän vuoksi onkin resurssitehokasta kehittää vanhoja kiinteistöjä vastaamaan paremmin tämän hetken kysyntää.

Eerikäisen ym. (2013) mukaan Suomen kiinteistömarkkinoilla ei osata vielä markkinoida vihreitä kiinteistöjä tehokkaasti, koska esimerkiksi kaikkia hyötyjä ei osata perustella asiakkaille konkreettisesti. Tämän vuoksi vihreiden kiinteistöjen potentiaalia jää käyttämättä. Näillä kiinteistöillä voi siis olla enemmän arvoa ja kysyntää tehokkaamman

markkinoinnin avulla. Monesti luotetaan liikaa siihen, että kun rakennus on ympäristösertifioitu, niin se jo itsessään markkinoi tarpeeksi kiinteistön vihreyden puolesta. Kuitenkin vihreiden kiinteistöjen markkinoinnissa tulee keskittyä varsinkin niihin viheryyttä tuoviin lisäominaisuuksiin ja etuihin, jonka avulla kiinteistö pystyy erottumaan monista muista kiinteistöistä edukseen. Vihreiden kiinteistöjen tehokkaalla markkinoinnilla pystytään luomaan enemmän kysyntää kyseisiin kiinteistöihin. Toisaalta vihreiden kiinteistöjen markkinoinnissa voidaan myös epäonnistua, jolloin kiinteistön kilpailukykyä markkinoilla jopa heikkenee aiempaan verrattuna. Tämän vuoksi markkinointi ei saa vaikuttaa vain viherpesulta, eli pinnalliselta mainonnalta, jossa hyödynnetään mielikuvaa kohteen ympäristö-ystävällisyydestä, vaikka todellisuudessa kohde ei selkeästi sellainen olekaan. Tämän vuoksi argumenttien taustalla tulee olla selkeitä ja konkreettisia faktoja tukemassa markkinointia. Tällaisia konkreettisia faktoja voivat olla esimerkiksi näkyvä aurinkopaneelijärjestelmä tai vuotuinen energiakustannusten aleneminen sähkölaskussa energiatehokkuusparannuksien myötä.

Kiinteistöalalla lasketaan yleensä investointien kannattavuutta lähinnä takaisinmaksuajan näkökulmasta. Esimerkiksi uusittaessa vanhanaikaista valaistusta LED-valaistukseksi, saadaan investoinnin avulla selkeä alenema vuotuisiin sähköenergiakustannuksiin. Myös esimerkiksi aurinkopaneeliin investoimalla säästetään jatkossa sähkölaskussa aurinkopaneelien tuottaman sähkönsä vuoksi. Vaikka aurinkopaneeli-investoinnilla onkin yleensä pidempi takaisinmaksuaika verrattuna valaistuksen päivittämiseen, voidaan aurinkopaneeliin investoimalla korottaa kiinteistön arvoa saatavan positiivisen imago vaikutuksen myötä. Monesti päättäjät kuitenkin turvautuvat pelkkään takaisinmaksuajan näkökulmaan, koska laskelman tuloksena saadaan yksinkertainen ja vertailukelpoinen luku vaihtoehtojen paremmuuden arviointiin. Investoinnin epäsuora vaikutus kiinteistön imagoon on selvästi hankalampi arvioida kuin pelkkien suorien rahallisten arvojen arviointi, minkä lisäksi arviointi sisältää enemmän riskejä. Tämän johdosta imagoarvon muutoksen vaikutus kiinteistön arvoon jätetään monesti näiden syiden takia huomioimatta. (Eerikäinen 2013 ym.)

Pöyryn kiinteistömarkkinoiden katsauksen (2010a) mukaan suuri osa lähitulevaisuuden rakennuksista tulee olemaan joko ympäristösertifioituja tai matalaenergiarakennuksia. Siksi ympäristöluokitusten tullessa yhä suosituimmiksi, niiden avulla saatavan kilpailuedun merkitys vähenee. Yleensä uusi asia saa merkittävästi enemmän huomioita alkuvaiheessa, kuin myöhemmin innostuksen laantuessa. Toisaalta sertifiointin yleistymisen voi vaikuttaa negatiivisesti sertifioiduttomien kiinteistöjen kilpailukykyyn markkinoilla. Esimerkiksi Newsecin selvityksen mukaan jo 60 % sijoittajista on sitä mieltä, että viiden vuoden kuluessa sertifioidut kiinteistöt jäävät markkina-alueen reunoille. (RAKLI ry 2014) Tulevaisuudessa esimerkiksi aurinkopaneelit ovat todennäköisesti niin arkipäiväinen asia, että niillä ei saada kiinteistömarkkinoilla kilpailuetua lainkaan. Kuvasta 12 nähdään kuinka merkittävästi Suomessa on vuosien 2014–2015 aikana yleistynyt juuri suuremman mittakaavan, teholtaan yli 15 kWp suuruisten, aurinkosähköjärjestelmien asennukset. Mikäli kasvu jatkuu samanlaisena, tullaan tulevaisuudessa todennäköisesti lähes kaikkien uudistomistorakennusten katoille asentamaan aurinkosähköjärjestelmät. Tällöin erottuakseen kiinteistömarkkinoilla tulee hyödyntää suuremman uutuusarvon omaavia moderneja ratkaisuja.



Kuva 12. Yli 15 kWp aurinkosähköjärjestelmien vuotuiset asennusmäärät Suomessa, yhteisteho (kWp). (Auvinen ym. 2016a)

7 Energiaratkaisujen tarkemmat tarkastelut

7.1 Aurinkosähkön hyödyntäminen Colosseumissa

7.1.1 Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus

Rakennuksen pohjakuorma on tuntikohtaisen sähkömittaroinnin perusteella noin 400 kW, joten käytettävissä olevalla kattopinta-alalla kaikki tuotettu aurinkosähkö saadaan tarkastelujen perusteella hyödynnettyä kohteessa. Aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa rajoittavana tekijänä on tällöin hyödynnettävä kattopinta-ala. Mitoituksen kriteereinä käytetään aurinkosähkön laskennallista tuotantomäärää sekä järjestelmän kustannustehokkuutta.

Aurinkopaneelit rakennuksen tasakatolle sijoitettuna ovat looginen vaihtoehto asennuspaikalle, koska ne voidaan asentaa optimaaliseen suuntauskulmaan osoittamaan etelää kohti. Lisäksi tasakatolla paneelit voidaan asentaa sopivaan kaltevuuskulmaan telineiden avulla. Vaikka suurin tuotto paneelia kohti saadaan suuntaamalla ne etelää kohti noin 35 asteen kaltevuuskulmaan (Euroopan komissio 2016c), tulee optimaalisen kaltevuuskulman valinnassa huomioida suuremman kaltevuuskulman aiheuttama varjostus hyödynnettävän kattopinta-alan ollessa rajoitettu. Paneelien suurempi kaltevuuskulma aiheuttaa suuremman varjostuksen, joka taas kasvattaa peräkkäisten paneelirivistöjen asennusväliä. Tästä johtuen suuremmalla kaltevuuskulmalla varjostamattomia paneeleita mahtuu katolle vähemmän. Pienemmällä kaltevuuskulmalla saadaan siis asennettua enemmän paneeleita, mutta samalla saatava tuotto paneelia kohden on hieman pienempi, mikä taas heikentää kustannustehokkuutta. (Euroopan komissio 2016c) Toisaalta hyvin matalan kaltevuuskulman omaavat paneelit eivät puhdistu sateiden aikana niin hyvin verrattuna jyrkemman kulman paneeleihin. Esimerkiksi lintujen jätökset ja kertyvä pöly voivat aiheuttaa tehohäviöitä peittämällä osan paneelipinnasta. Siksi loivaan kaltevuuskulmaan asennettujen paneelien huoltoon tulee kiinnittää hieman enemmän huomiota. (Mertens 2013) (Motiva 2016e)

Aurinkopaneelien osalta on tarkasteltu useita eri laskentatapauksia. Kaikissa tapauksissa paneelien maksimimäärää arvioitaessa on huomioitu paneelien aiheuttama varjostus toisilleen, minkä perusteella on määritetty peräkkäisten paneelirivien asennusväli. Asennusväli lasketaan yhtälöllä (1) seuraavasti (Mertens 2013):

$$d_{min} = b \cdot \frac{\sin(\gamma_a + \beta)}{\sin \gamma_a} \quad (1)$$

d_{min} = aurinkopaneelien asennusväli

γ_a = auringon korkeuskulma

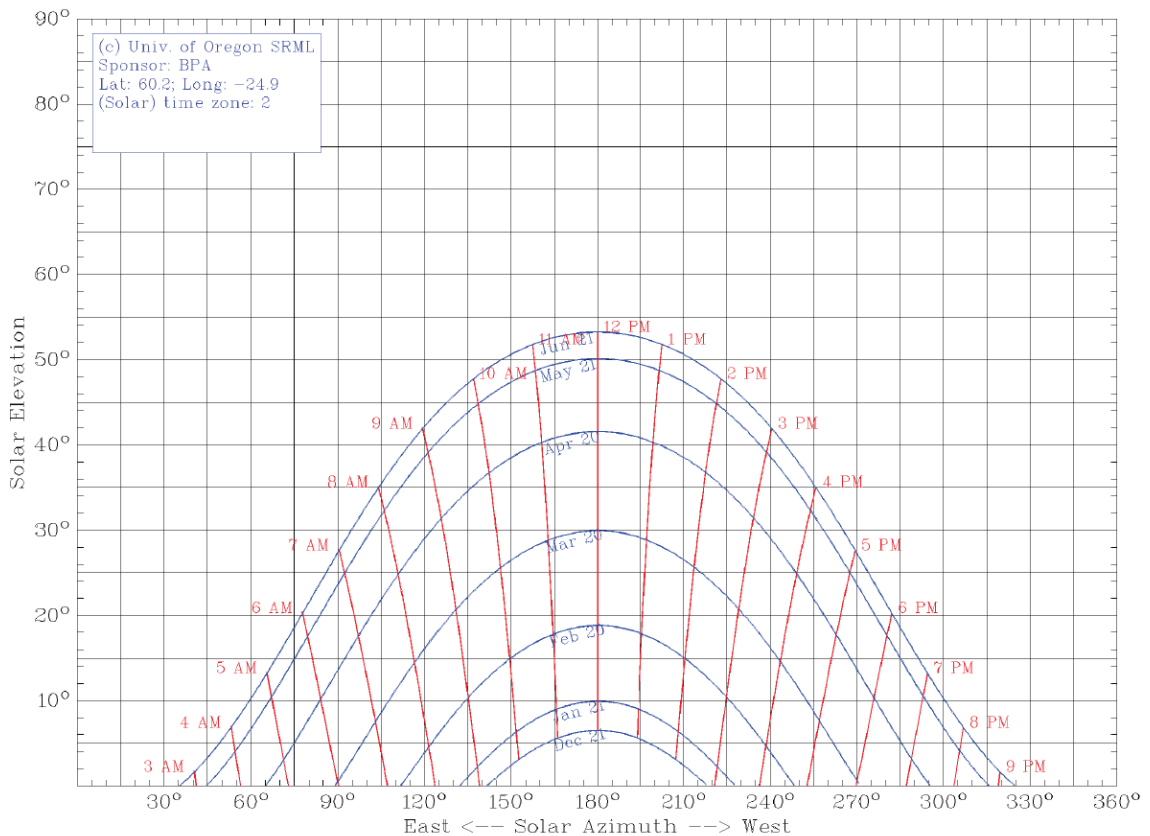
β = paneelin kallistuskulma

b = paneelin korkeus/leveys, riippuen miten päin paneeli asennetaan

Auringon korkeuskulma vaihtelee eri aikoina sijainnista ja suunnasta riippuen. Mikäli asennusväli lasketaan esimerkiksi 15 asteen kaltevuuskulmalla, tulee asennusväliksi noin 2,4 m auringon korkeuskulman ollessa 10 astetta ja paneelin korkeuden ollessa noin 1 m. Varsinkin talviaikaan auringon paistaessa matalalla alle 10 asteen korkeuskulmassa, peräkkäiset aurinkopaneelit alkavat varjostaa toisiaan, ja ainoastaan etummainen rivi välttyy varjostukselta. (University of Oregon 2007) Pienikin varjostus aiheuttaa kuitenkin merkittäviä tehohäviöitä etenkin sarjaan kytketyissä aurinkopaneelissa,

joten varjostuksen huomiointi järjestelmää mitoittaessa on hyvin tärkeää. (Gao 2009 ym.)

Oregonin yliopiston laskurin avulla nähdään auringon korkeuskulma eri vuoden- sekä kellonaikoina pääkaupunkiseudulla. Kuvasta 13 nähdään, että keskipäivän aurinko on matalimmillaan joulukuussa, jolloin auringon korkeuskulma on vain noin 6,5 astetta. (University of Oregon 2007) Yhtenä vaihtoehtona on käyttää tätä auringon korkeuskulmaa mitoituksessa. Toisaalta talvella paneelit saattavat muutenkin olla lumen peitossa ja tuotto on varsin vähäistä, minkä vuoksi mitoituksessa tullaan käyttämään suurempaa korkeuskulmaa. (Euroopan komissio 2016)

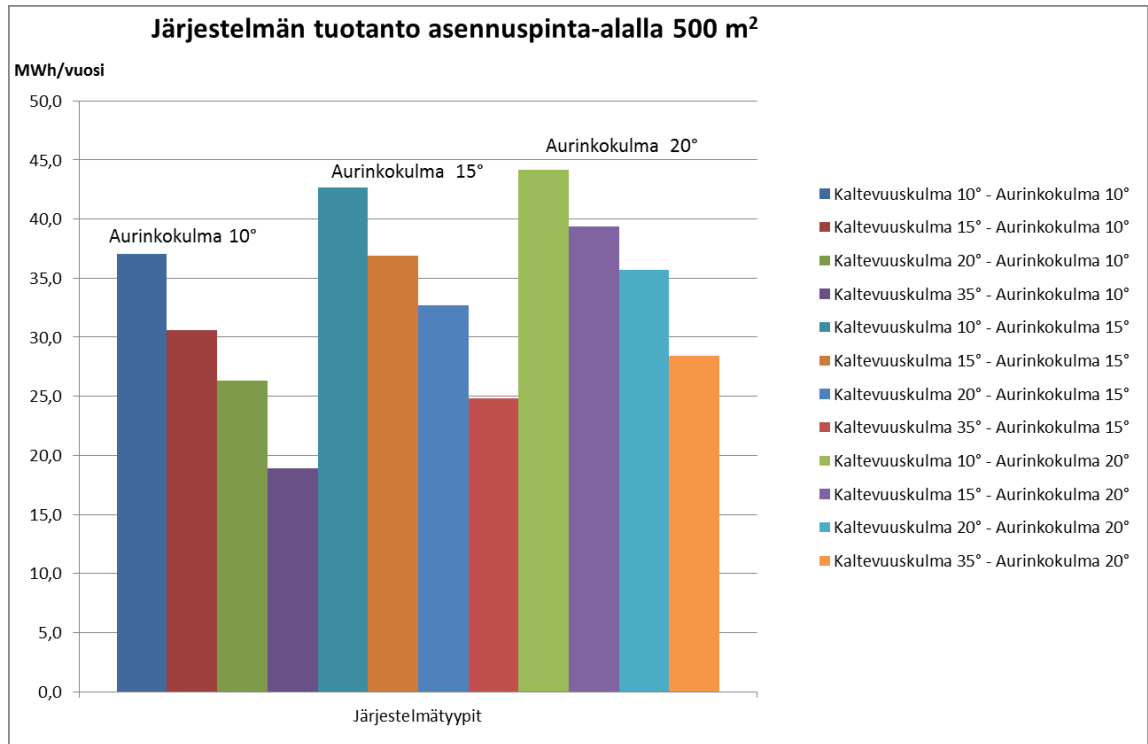


Kuva 13. Auringon korkeuskulma pääkaupunkiseudulla ajan ja suuntauskulman mukaan (University of Oregon 2007).

Myös muut varjostukset paneelien oman varjon lisäksi huomioidaan järjestelmän mitoituksessa. Paneeleita ei sijoiteta kohtiin, joissa on muuta varjostusta, kuten esimerkiksi IV-konehuoneen vieressä. Lisäksi on huomioitu, että paneelien etäisyys katon reunasta tulee olla vähintään 0,5 m. Tuulen vaikutus katon rakenteisiin on suurin katon reunalla, joten tämän vuoksi paneeleita ei sijoiteta aivan katon reunalle. (HSY 2016). Suuren sähkön pohjakuorman vuoksi kaikissa tapauksissa tuotettu aurinkosähkö pystytään kokonaisuudessaan hyödyntämään kiinteistössä. Mahdollisessa aurinkosähköjärjestelmän investointipäätöksessä tulee huomioida myös lähiaikojen vesikattoremontit, joita asennettu aurinkosähköjärjestelmä voi hankaloittaa.

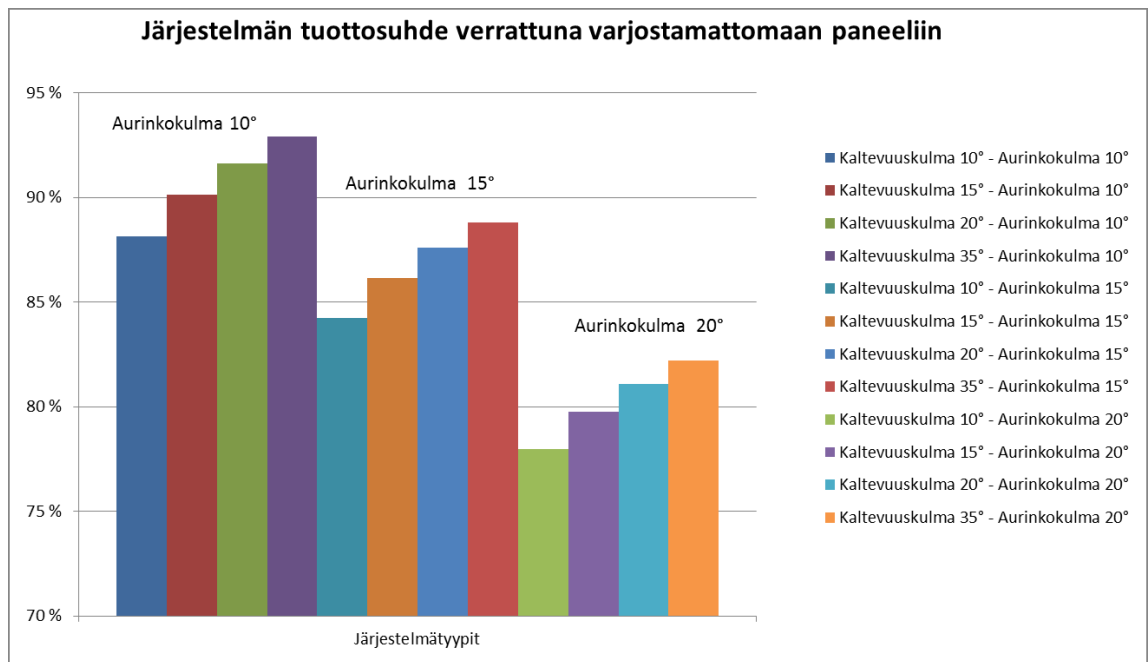
Aurinkopaneelien mitoitus kohteeseen aloitettiin määrittämällä paneelien optimaalinen kaltevuuskulma sekä asennusväli tasakattoasennukseen huomioiden auringon korkeuskulman vaikutuksen paneelien aiheuttamaan varjostukseen. Tarkastelussa on laskettu aurinkosähköjärjestelmän vuotuinen tuotanto eri kaltevuus- ja aurinkokulmilla ja käytet-

ty asennuspinta-alan kokona vakioalaa 500 m². Ilmatieteenlaitoksen tuntikohtaisia säteilytietoja hyödynnettiin laskennassa. (Ilmatieteenlaitos 2016) Kuvassa 14 on esitetty laskennan tulokset eri kulmavaihtoehdoille. Mitoitettaessa paneelit 15 asteen aurinko- ja kaltevuuskulmalla, pystytään suuremman paneelimäärän seurauksena järjestelmällä tuottamaan aurinkosähköä vuodessa lähes kaksinkertaisesti verrattuna mitoitus tapaukseen, jossa aurinkokulmana on käytetty 10 astetta ja kaltevuuskulmana 35 astetta. Vaikka ensimmäisessä tapauksessa pystytään tuottamaan huomattavasti enemmän aurinkosähköä, jää kustannustehokkuus paneelia kohti on heikoksi pienemmän kaltevuuskulman ja varjostuksista aiheutuvien häviöiden seurauksena. (Mertens 2013)



Kuva 14. Aurinkosähköjärjestelmän vuotuinen tuotanto eri kaltevuus- ja aurinkokulmilla.

Kaikille vaihtoehdoille on myös laskettu niiden tuotannon suhde verrattuna täysin varjostamattomaan paneelirivistöön. Suhdelukua laskiessa on oletettu, että tuottoa ei saada lainkaan auringon laskiessa riittävän matalaan korkeuskulmaan, jolloin paneelit alkavat varjostaa toisiaan. Todellisuudessa järjestelmä tuottaa tehoa edelleen, mutta jo pienikin varjostus pudottaa tehoa merkittävästi verrattuna varjostamattomaan paneeliin. Myös tässä tarkastelussa asennuspinta-ala kaikissa eri vaihtoehdoissa on vakio 500 m². Laskennan tulokset nähdään kuvasta 15. (Mertens 2013)



Kuva 15. Aurinkosähköjärjestelmän tuottosuhte (%) verrattuna varjostamattomaan paneeliin eri kaltevuus- ja aurinkokulmilla.

Tarkastelujen perusteella tuotanto on noin 3 prosenttiyksikköä heikompi paneelia kohti 15 asteen kulmalla verrattuna 35 asteen kulmaan kaikilla auringon korkeuskulmilla, mutta 15 asteen kaltevuuskulmalla paneeleita mahtuu tasakatolle noin 53 % enemmän. Tällöin vuotuinen aurinkosähkön kokonaistuotanto on noin 49 % suurempi. Kääntöpuolelana ovat hieman suuremmat investointikustannukset tuotettua MWh:a kohden. Nämä investointikustannukset tuotettua MWh:a kohti ovat kuitenkin vain 3 % suuremmat 15 asteen kaltevuuskulmalla verrattuna 35 asteen kaltevuuskulmaan. (Mertens 2013)

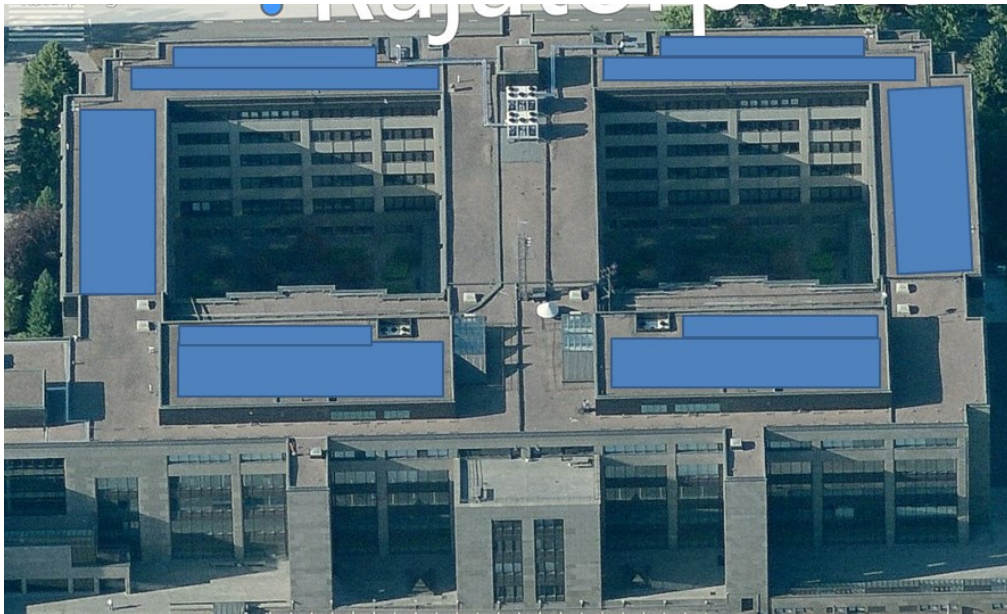
Tässä kappaleessa myöhemmin esiteltävän elinkaarikustannuslaskennan perusteella 25 vuoden tarkastelujaksolla matalampi kallistuskulma ja sen myötä suurempi aurinkosähköntuotanto ei maksa itseään takaisin, vaikka aurinkosähköä pystytään pienemmällä kulmalla tuottamaan huomattavasti enemmän suuremman paneelimäärän ansiosta. Toisaalta suurempi kaltevuuskulma aiheuttaa paneeleihin ja niiden kiinnitysrakenteisiin kohdistuvan suuremman tuulikuorman. Esimerkiksi Jonas Westinin maisterityön perusteella tasakatolle asennettujen paneelien kaltevuuskulman kasvattaminen 15 asteesta 25 asteeseen kasvattaa tuulikuormaa keskimäärin noin 26 %. (Westin 2011) Suurempi tuulikuorma vaatii siksi suuremman kuormituksen kestäviä katto- ja telinerakenteita, joka merkitsee myös suurempia kustannuksia. Tällöin aurinkopaneelien matalampi asennuskulma vaikuttaa järkevimmältä vaihtoehdolta tasakattoasennuksessa myös elinkaarikustannusten näkökulmasta.

Toisaalta aurinkopaneelien optimaalista kaltevuuskulmaa sekä määrää mitoitettaessa tulee myös huomioida vaikutus E-lukuun. Laskennan perusteella yksikkökustannukset kasvavat tuotettua MWh:a kohden kasvavat pienemmän kaltevuuskulman seurauksena, mutta aurinkoenergiaa pystytään tällöin tuottamaan enemmän. Tällöin paneelien kaltevuuskulmaa ja asennusväliä säätämällä voidaan optimoida aurinkopaneelien tuotantoa siten, että päästään parempaan E-lukuluokkaan, mikäli tämä on kohteessa realistista aurinkopaneelien avulla. (Mertens 2013)

Paneelien kaltevuuskulmaksi on tarkastelujen perusteella valittu 15 astetta. Tällöin katolle mahtuu huomattavasti enemmän paneeleita kuin esimerkiksi 35 asteen kulmalla, vaikka tuotanto pienemmällä kulmalla paneelia kohti ei ole aivan yhtä hyvä. Lisäksi 15 asteen kaltevuuskulmalla vältetään suuremman kulman aiheuttamasta suuremmasta tuulikuormasta johtuvat lisäinvestointikustannukset kattorakenteen kestävyys. (Mertens 2013)

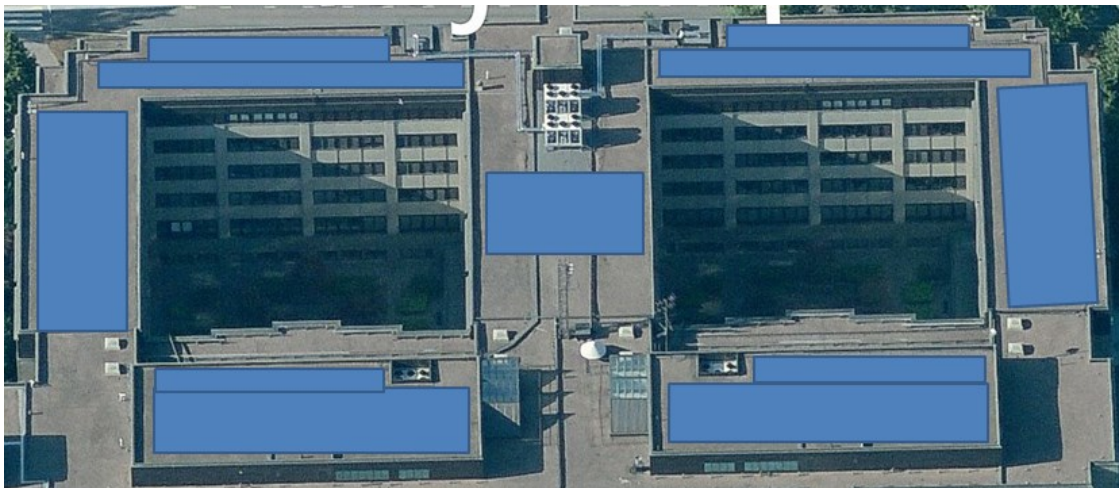
7.1.2 Aurinkosähkön tuotto eri laskentatapauksilla

Ensimmäisessä aurinkopaneelien laskentatapauksessa aurinkopaneelien asennusmäärä on pienin ja paneelit ovat sijoitettu rakennuksen katolle helpoimpiin asennussijainteihin rakennuksen katolle (Kuva 16). Tällöin katolle mahtuu noin 720 m² paneeleita merkityille alueille. Järjestelmän huipputeho on noin 109 kWp ja vuotuinen sähköenergian-tuotanto noin 73 MWh.

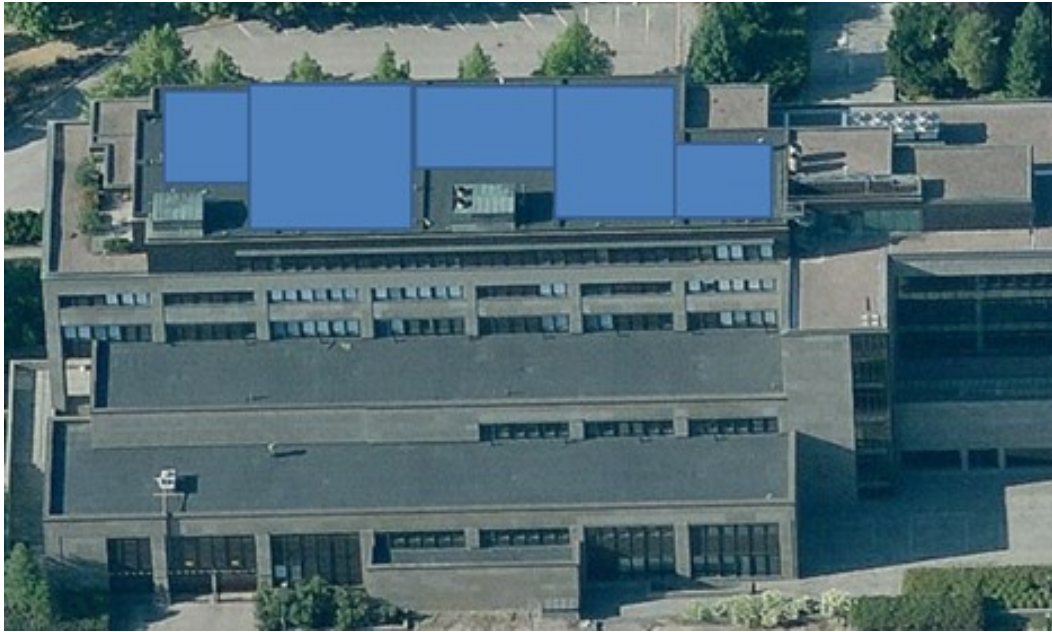


Kuva 16. Aurinkopaneelit - Laskentatapaus 1

Toisessa tapauksessa paneeleita sijoitetaan rakennuksen lounas-siivekkeeseen sekä sisäpihojen välissä olevalle kattokaistaleelle (kuvat 17 ja 18). Tällöin katolle voidaan sijoittaa lähes 1110 m² paneeleita merkityille alueille. Järjestelmän huipputeho on noin 167 kWp ja vuotuinen sähköenergian-tuotanto noin 130 MWh.

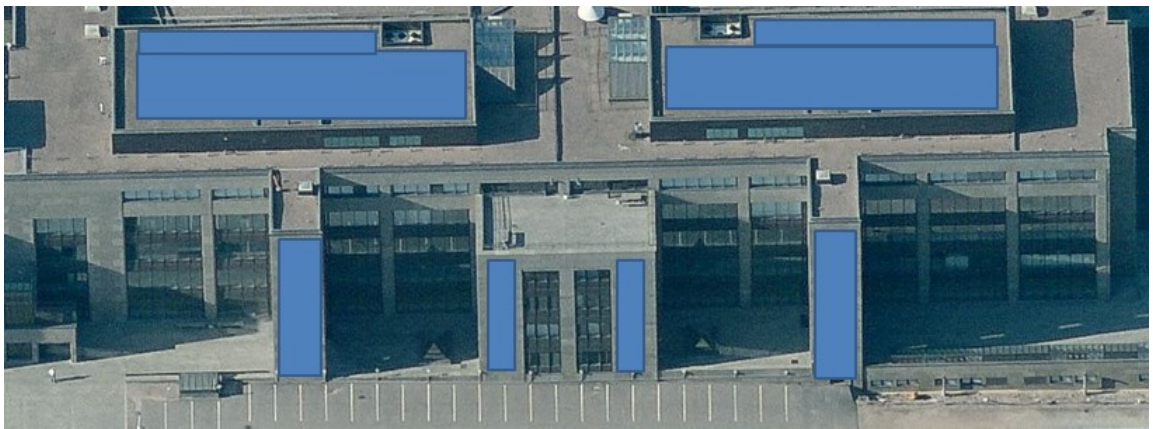


Kuva 17. Aurinkopaneelit - Laskentatapaus 2, itäosa



Kuva 18. Aurinkopaneelit - Laskentatapaus 2, länsiosa

Kolmannessa tapauksessa paneeleita sijoitetaan aiempien paneelien lisäksi myös etelän puoleiselle julkisivulle noin 200 m^2 (kuva 19). Tällöin paneeleita on yhteensä lähes 1310 m^2 . Järjestelmän huipputeho on noin 186 kWp ja vuotuinen sähköenergiantuotanto noin 140 MWh .



Kuva 19. Aurinkopaneelit - Laskentatapaus 3, julkisivun paneelit

7.1.3 Kustannukset

Aurinkosähkön kustannustehokkuuteen kiinteistössä vaikuttaa monta tekijää aurinkosähkön tuoton lisäksi. Colosseumin etuna aurinkosähkön kannalta on niin suuri kiinteistön pohjakuorma, sillä kaikki aurinkosähkö voidaan käyttää omassa kiinteistössä. Mikäli suurimman tuoton aikaan osa tuotetusta sähköstä joudutaan myymään verkkoon, heikentää tämä kustannustehokkuutta, sillä ylijäämäsähköstä saatava korvaus on huomattavasti pienempi kuin verkosta ostettavan sähkön hinta. Tämä johtuu siitä, että sähköä ostaessa joudutaan maksamaan sähköenergian lisäksi myös sähkönsiirtomaksuja sekä veroja. Lisäksi ylijäämän sähköenergian myynnistä aiheutuu kuluja, jotka sähköyhtiö veloittaa pientuottajalta maksamalla hieman pienempää korvausta sähköenergian spot-markkinahintaan verrattuna. (Motiva 2016f)

Toisaalta aurinkosähkön kustannustehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi sen vaihtoehtoiskustannuksen, eli verkkosähkön hinta. Toimistorakennuksilla on yleensä matalampi sähkön kokonaishinta asuinrakennuksiin verrattuna. Colosseumissa sähköenergian kokonaishinta siirtomaksuineen sekä sähkövero mukaan lukien on noin 90 €/MWh (alv 0 %).

Katolle telineisiin asennettavan aurinkopaneelijärjestelmän investointikustannuksena on käytetty 1300 €/kWp lähiaikoina toteutettujen kohteiden kustannustietojen perusteella. Investointikustannus on samaa luokkaa myös FinSolarin arvioiden mukaan. (Auvinen ym. 2016b) Tässä työssä on huomioitu TEM:in vuonna 2016 myöntämä tyypillinen 25 % investointituki yritysten aurinkosähkölaitteille, jolloin aurinkosähkölaitteiden hinta on noin 1000 €/kWp. (TEM 2016) Tuen osuus voi muuttua tulevaisuudessa. Esimerkiksi vuonna 2015 TEM:in myöntämä tuki aurinkopaneelille oli 30 %, joten mikäli on tarkoitus investoida vasta muutaman vuoden päästä, ei tällöin välttämättä enää myönnetä samaa tukiosuutta (Motiva 2015b). Aurinkosähkölaitteiden asentamisen ei arvioida aiheuttavan vuokralaisille merkittävää haittaa.

Julkisivupaneelien investointikustannus on huomattavasti tavallisia paneeleita korkeampi, noin 2000 €/kWp ilman TEM:in investointitukea ja tuen kanssa noin 1500 €/kWp (TEM 2016) (Ruukki 2015) Julkisivupaneelit ovat näyttäviä, mutta niiden tuotto on pysyvästi kaltevuuskulman seurauksena heikompi. (Ympäristöministeriö 2013a) Lisäksi niissä hyödynnetään yleensä ohutkalvoteknologiaa, jonka hyötysuhde on heikompi verrattuna perinteisiin pii-pohjaisiin aurinkopaneelisiin. Toisaalta asennettaessa julkisivupaneeleita julkisivusaneerauksen yhteydessä, on julkisivuun integroitava aurinkosähkölaitteiden varsin kustannustehokas vaihtoehto verrattuna muihin julkisivuratkaisuihin, kuten kuvasta 20 nähdään. (Verbene G ym. 2014).



Kuva 20. Eri julkisivumateriaalien avaimet käteen -kustannukset (Verbene G ym. 2014). BIPV = julkisivupaneeli (Building Integrated Photovoltaics).

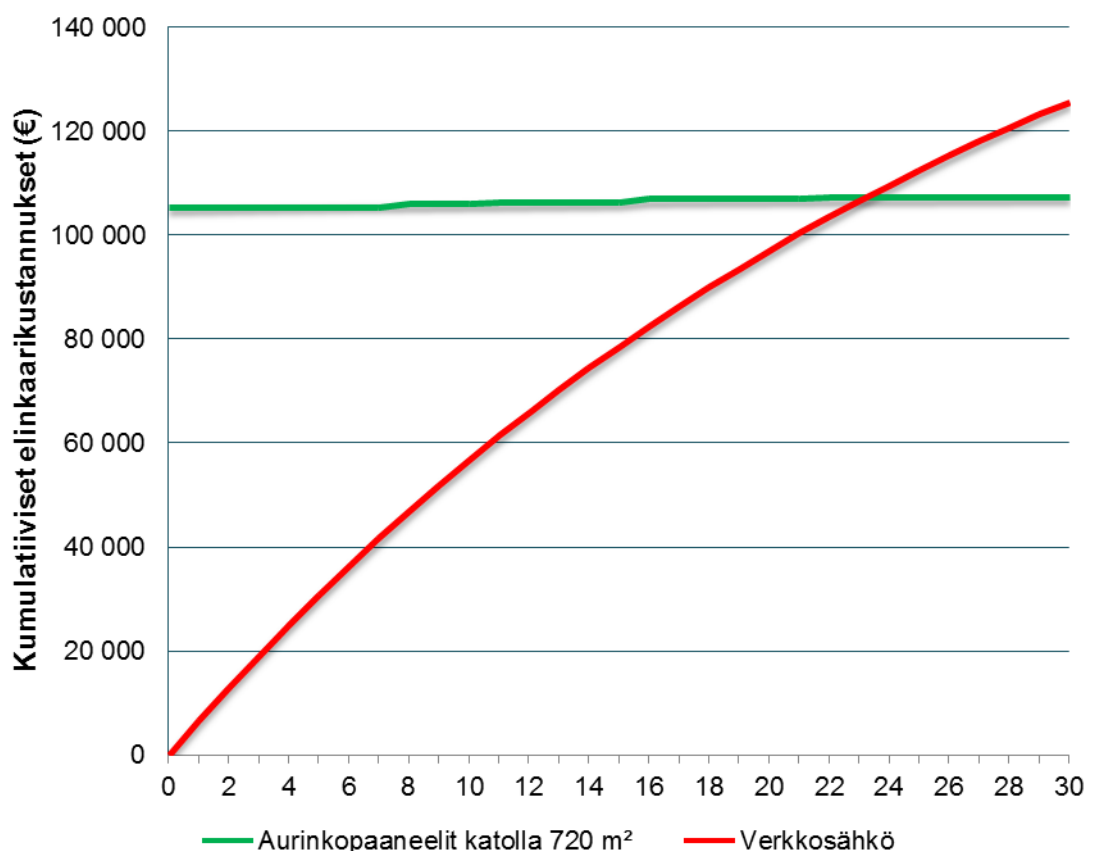
Aurinkosähkölaitteiden elinkaarikustannuksia verrattiin vaihtoehtoiseen verkkosähkön hyödyntämällä nettonykyarvolaskennan yhtälöä (2) (Lehtonen 2004):

$$NPV = \sum_{i=1}^k \frac{(T_i - K_i)}{(1+r)^i} = 0 \quad (2)$$

NPV = investoinnin nettonykyarvo (€)

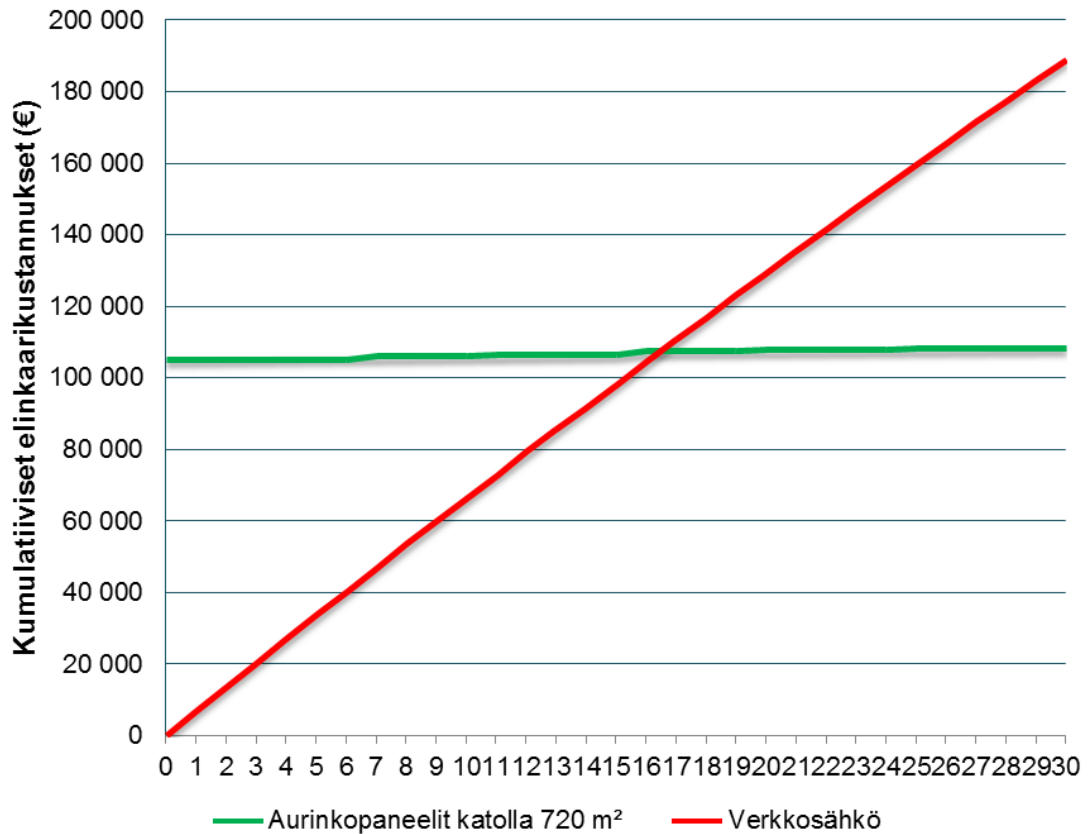
T_i = investoinnista aiheutuvat tulot vuonna i (€)
 K_i = investoinnista aiheutuvat kulut vuonna i (€)
 r = korkokanta

Kuvassa 20 on esitetty laskentatapauksen 1 elinkaarikustannukset verkkosähköön verrattuna. Elinkaarilaskelmassa on huomioitu sähkönhinnan nousuna 2,5 %, joka on arvioitu Tilastokeskuksen tilastojen perusteella (Tilastokeskus 2016). Lisäksi työssä on huomioitu inflaationa 2 %, joka on Euroopan keskuspankin inflaatiotavoitteen mukaan. (Euroopan keskuspankki 2016) Laskentakorkona on käytetty asiakkaan haastattelun perusteella 5 %. Aurinkosähköjärjestelmän elinkaarikustannuslaskelmassa huomioidaan myös paneelien hyötysuhteen vuotuinen heikentymä, joka on nykyisillä paneeleilla noin 0,5 % vuodessa. (Fraunhofer 2014) Kaikkien katolle asennettavien aurinkopaneelien hyötysuhteena on käytetty 15 %, koska paneelit ovat tyypiltään monikiteisiä paneeleita. Julkisivupaneelit perustuvat ohutkalvoteknologiaan, joten niiden hyötysuhde on noin 10 %. (Motiva 2016g) Järjestelmän kokonaishäviöksi on arvioitu EU:n komission aurinkosähkölaskurin avulla tarkasteltaville paneeleille Vantaan alueelle noin 22,6 %. (Euroopan komissio 2016) Hintatasona järjestelmälle asennuskustannukset mukaan lukien on käytetty 1 300 €/kWp (alv 0 %). Elinkaarikustannuksissa on huomioitu invertterien uusiminen viidentoista vuoden välein, minkä suuruutena on käytetty 8 % investointikustannuksista FinSolar-hankkeen perusteella. (FinSolar 2016) Lisäksi laskelmassa on huomioitu vuotuiset ylläpitokustannukset, joiden suuruudeksi on arvioitu 0,5 % investointikustannuksista. Kuvassa 20 esiintyvän elinkaarikustannuslaskennan tulosten perusteella paneelit maksavat itsensä takaisin vasta noin 21 vuoden kuluessa.



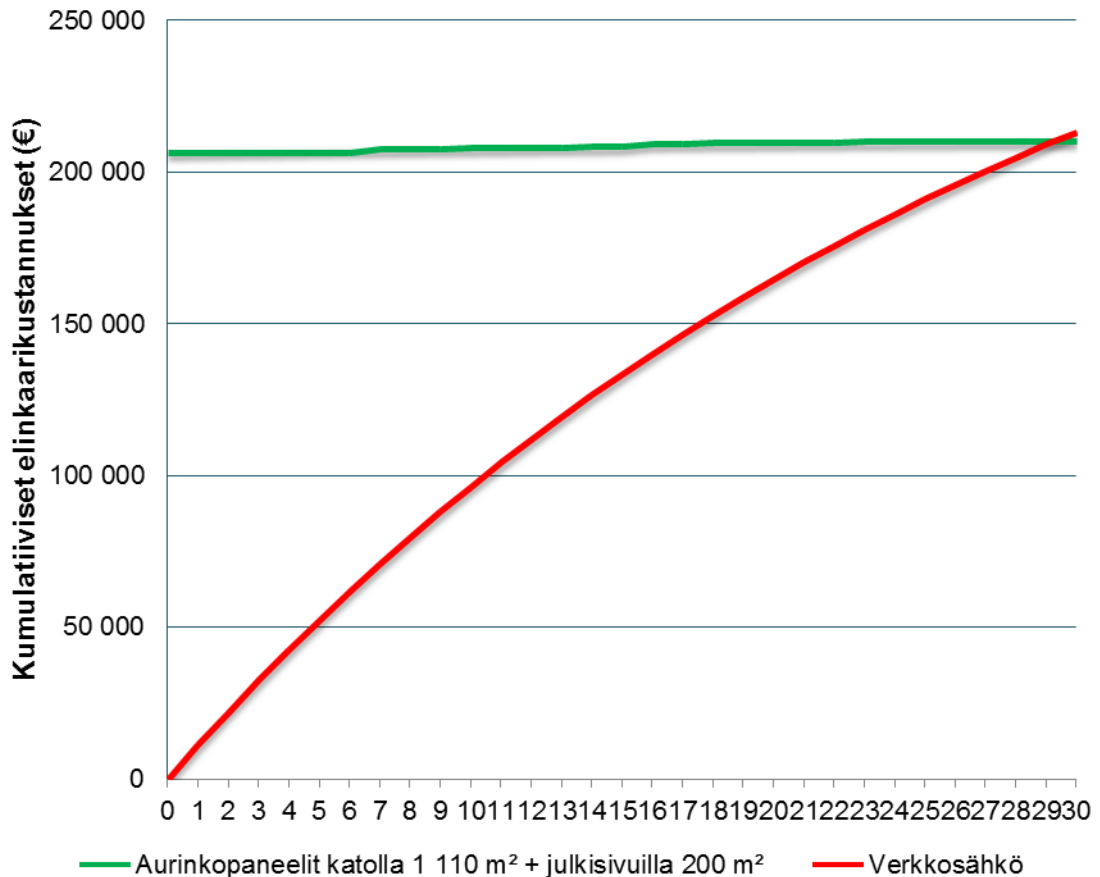
Kuva 21. Aurinkopaneelijärjestelmän elinkaarikustannukset verkkosähköön verrattuna laskentakorolla 5 %.

Kuvassa 22 on esitetty herkkyystarkasteluna sama elinkaarilaskelma 720 m² aurinkosähköjärjestelmän ja verkkosähkön välillä 2 % laskentakorolla. Kuvan elinkaarikustannuslaskennan perusteella takaisinmaksuaika on tällöin noin 17 vuotta. Pienempää laskentakorkoa voidaan käyttää esimerkiksi jos ajatellaan ratkaisulla olevan muutakin lisäarvoa tuotetun energian lisäksi.



Kuva 22. Aurinkopaneelijärjestelmän elinkaarikustannukset verkkosähköön verrattuna laskentakorolla 2 %.

Kuvassa 23 on esitetty elinkaarikustannukset vaihtoehdolle, jossa katolle asennetaan 1 110 m² paneeleita ja julkisivulle noin 200 m² paneeleita. Laskentakorkona käytettiin 5 %:a. Tämän yhdistetyn järjestelmän kustannustehokkuus on pelkälle katolle asennettavaa järjestelmää heikompi, sillä julkisivupaneelit eivät ole kustannustehokkaita heikon sähköntuotannon vuoksi.



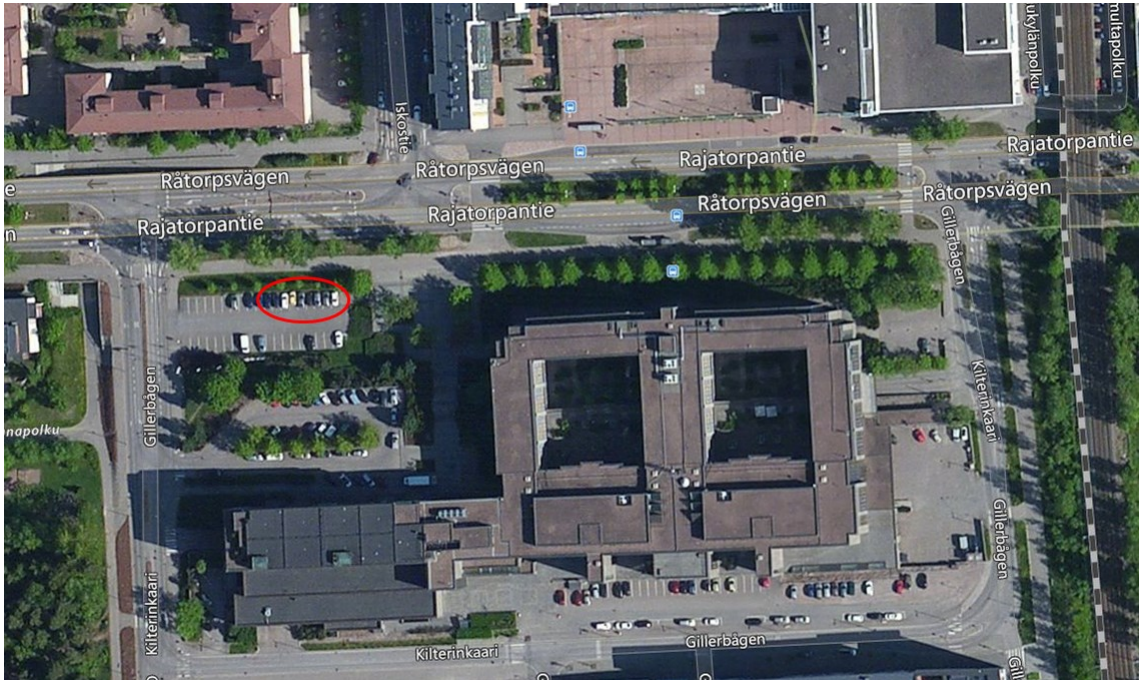
Kuva 23. Aurinkopaneelit katolla ja julkisivulla - Elinkaarikustannukset verkkosähköön verrattuna 5 % laskentakorolla.

7.1.4 Aurinkopaneelikatot sähköautoille

Kohteeseen kuuluvan autohallin lisäksi kiinteistön tontilla sijaitsee runsaasti parkkipaikkoja myös ulkona. Osa näistä parkkipaikoista voidaan kattaa autokatoksella, joka toimii sekä normaalina autokatoksena että myös integroituna aurinkosähköjärjestelmänä. Lisäksi tämän aurinkopaneelikatoksen tuottamaa aurinkosähköä voidaan hyödyntää sähköautojen lataukseen.

Yhtenä vaihtoehtona katoksen sijoituspaikalle on sen asentaminen näkyvälle paikalle Rajatorpantien viereiselle parkkipaikalle rakennuksen luoteispuolelle lähelle kohteen pääsisäänkäyntiä (Kuva 24). Kyseisessä sijainnissa mikään ei varjosta paneeleita auringon korkeuskulman ollessa yli 30 astetta. Tällöin auringon vuotuisesta säteilystä saadaan hyödynnettyä vain noin 86 %, koska alle 30 asteen aurinkokulmalla varjostusta alkaa esiintyä. (University of Oregon 2007) Toisaalta Suomessa kesäaikaan auringon korkeuskulma on pääosin yli 30 astetta työaikoina klo 7 – 17 välillä, joten sähköautojen ollessa tällöin latauksessa, ovat paneelit täysin varjostamattomia ja tuottavat aurinkosähköä sähköautojen tarpeeseen. Lisäksi tulee huomioida mahdollinen täydentämISRakentaminen, ja valita lopullinen sijainti sen mukaan, että mahdollinen lähivuosisien täydentämISRakentaminen ei aiheuta varjostuksia tai purkamistoimenpiteitä aurinko-

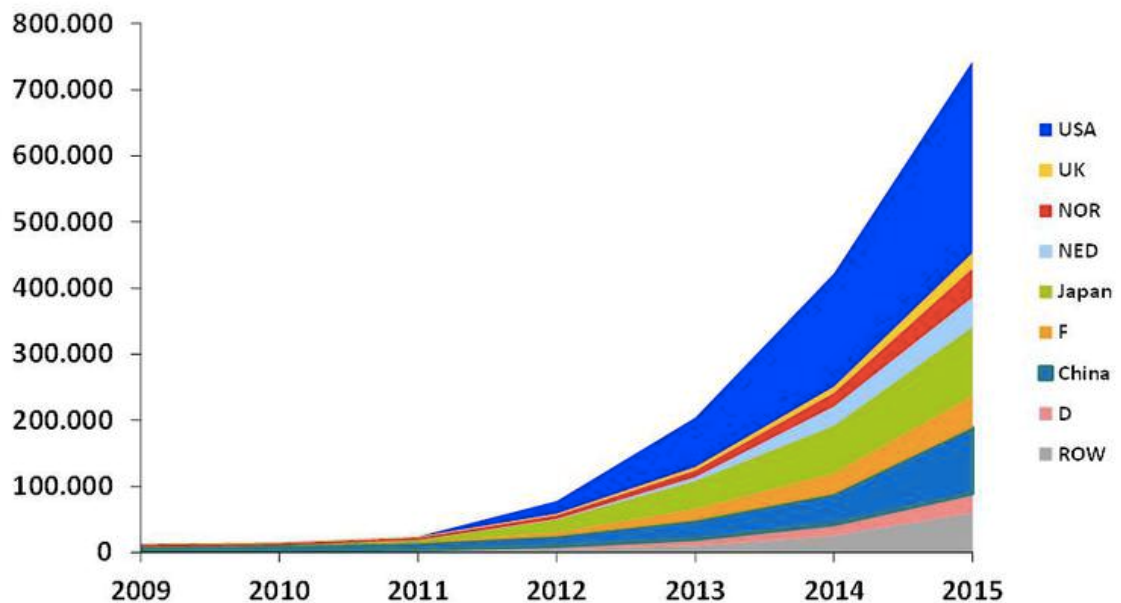
paneelikatokselle. Kyseiselle sijainnille ei kuitenkaan ole tiedossa täydentämiskäytännöistä tällä hetkellä.



Kuva 24. Aurinkopaneelikatoksen sijainti rakennuksen tontilla.

Katoksella tuotettava aurinkosähkö tulee hyödyntää myös niinä aikoina, kun sähköautoja ei ole ollenkaan latauspaikoilla, jotta järjestelmän koko tuotantopotentiaali pystytään hyödyntämään. Mikäli tätä tarkoitusta varten katoksen yhteyteen asennetaan akkuja, kasvavat investointikustannukset huomattavasti saatavaan hyötyyn nähden. Tämän vuoksi aurinkokatoksen yhdistäminen rakennuksen sähköverkkoon on kustannustehokkaampi ratkaisu, jolla voidaan varmistaa sähköautojen jatkuva lataaminen myös pilvisinä päivinä. Rakennuksen sähkön pohjakuorman on niin suuri, että katolle asennettavan aurinkopaneelijärjestelmän lisäksi myös aurinkokatoksen tuottama aurinkosähkö voidaan hyödyntää kohteessa helposti. Tämä ratkaisu nostaa aurinkokatosjärjestelmän hyötysuhdetta, kuitenkin kustannuksia merkittävästi lisäämättä. Lisäksi katoksen ollessa kytkettynä rakennuksen sähköverkkoon, saadaan sitä kautta lisää sähkötehoa autojen latausta varten, mikäli sähköautojen tehon kysyntä esimerkiksi jonain pilvisenä päivänä ylittää aurinkokatoksen tuottaman sähkötehon.

Sähköautojen määrä tulee viimeaikaisen kehityksen perusteella moninkertaistumaan Suomessa lähitulevaisuudessa. (Trafi 2016) Tämän seurauksena kysyntä sähköautojen latauspaikoista kasvaa, mikä tarjoaa mahdollisuuksia myös uuteen liiketoimintaan sähköautojen latauspisteitä tarjoamalla. Kuvassa 25 on esitetty sähköautojen määrän globaali kasvu. Kasvun pohjalla ovat muun muassa sähköauton edulliset polttoainekustannukset polttomoottoriautoihin verrattuna. Sähköauton käyttö ei myöskään synnytä ajon aikaisia pakokaasupäästöjä. (Motiva 2016h) Bensiniin pitkän aikavälin hintatrendin ollessa kasvava (Öljy- ja biopolttoaineala ry 2016), sähköautojen halpa käyttökustannus polttomoottoriautoihin verrattuna tulee yhä houkuttelevammaksi.



Kuva 25. Sähköautojen vuotuiset myyntimäärät globaalisti (Ayre 2015).

Liiketoiminnan näkökulmasta tulee pohtia ketkä saavat käyttöoikeuden katoksen latauspisteisiin ja joutuvatko he maksamaan sähköautonsa lataamisesta. Sähköautojen määrän ollessa Suomessa vielä varsin pieni, voi latauspistettä mainostaa jopa yleisenä ja luovuttaa sähköä edullisesti tai jopa ilmaiseksi esimerkiksi ensimmäisen vuoden ajan. Toinen luonnollinen vaihtoehto on antaa käyttöoikeus ainoastaan rakennuksen käyttäjille ilmaiseksi. Myöhemmin sähköautojen yleistyessä lataamisesta voidaan myös veloittaa käyttäjiä, jolloin kiinteistönomistaja kerää latausmaksut.

Autokatokseen integroitavan aurinkosähköjärjestelmän osalta tarkastellaan pinta-alaltaan noin 100 m^2 katosta, jonka leveys on noin 20 m. Autopaikkoja voidaan sijoittaa 2,5 m standardiväleillä 8 kappaletta. Autokatos integroidaan koko pinta-alaltaan aurinkopaneeleilla, joten paneelialaa on yhteensä lähes 100 m^2 . Aurinkopaneelijärjestelmän huipputeho on noin 15 kWp ja vuotuinen sähköenergian tuotanto noin 12 MWh ilman varjostuksia. Varjostukset huomioiden todellinen tuotanto on kuitenkin noin 10 MWh vuodessa. (University of Oregon 2007) (Mertens 2013)

Ensimmäisten sähköautojen oletetaan saapuvan latauspisteeseen klo 7 ja viimeisten autojen lähtevän latauksesta noin klo 17. Vuoden aikana auringon vaakapinnalle säteilevästä energiasta noin 87 % ajoittuu kyseiselle aikavälille. (Ilmatieteenlaitos 2016) Aurinkokatoksen tuottamaa aurinkosähköä ei voida hyödyntää kokonaisuudessaan sähköautoissa, kun oletetaan sähköautojen latauksen tapahtuvan klo 7 ja 17 välillä. Motivan mukaan sähköautojen akkujen kapasiteetti tällä hetkellä noin 20–30 kWh. (Motiva 2016h) Mikäli oletetaan, että sähköauton akun kapasiteetti on keskimäärin 25 kWh ja autot tulevat lataukseen keskimäärin 50 % latausasteella, pystytään 15 kWp:n aurinkosähköjärjestelmällä kattamaan keskimäärin kolmen sähköauton vuotuinen sähköenergian tarve. Talviaikaan aurinkosähköntuotannon ollessa heikkoa, joudutaan sähköautot lataamaan verkkosähköllä. Lisäksi aurinkosähköä saatetaan joinakin kesäpäivinä tuottaa yli sähköautojen tarpeen. Tämän vuoksi on perusteltua, että autokatokseen integroitu aurinkosähköjärjestelmä kytketään kiinteistön sähköverkkoon. Kuvassa 26 on esitetty esimerkki autokatokseen integroidusta aurinkosähköjärjestelmästä.

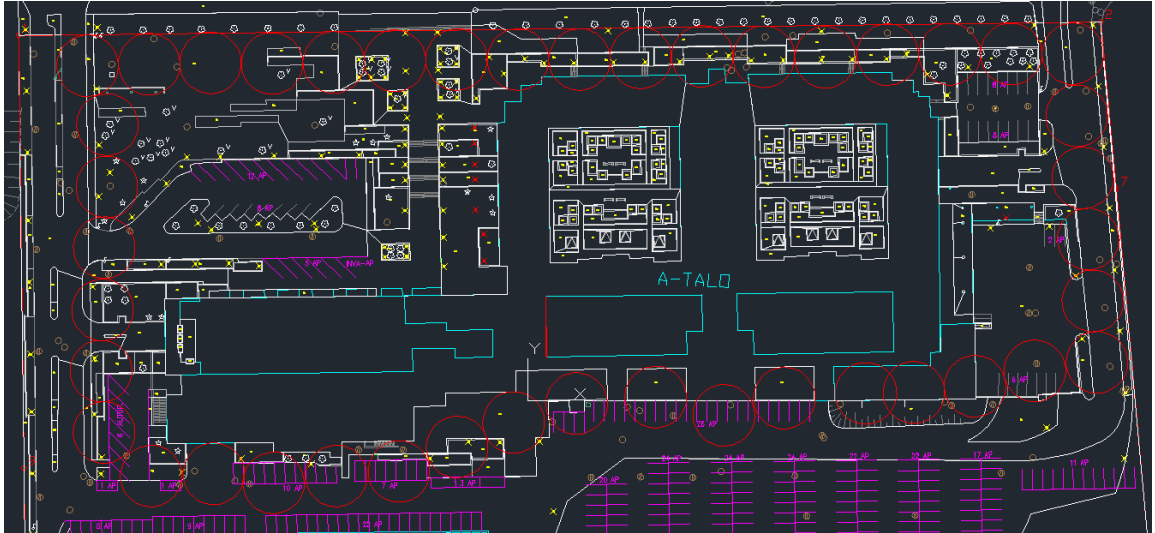


Kuva 26. Esimerkki aurinkopaneelikatoksesta autoille (Taspower 2016).

Tarkasteltavan kiinteistön houkuttelevuuden kannalta varsinkin Rajatorpantien viereen näkyvälle paikalle sijoitettava aurinkopaneelikatos sähköautoille voi saada paljon positiivista huomiota. Aurinkopaneelikatos voi tavallaan toimia rakennuksen käyntikorttina modernien energiaratkaisuiden suhteen. Rakennuksen katolla sijoitettavat aurinkopaneelit eivät varsinaisesti ole kovin näkyvä ratkaisu, koska ne eivät näy maanpinnan tasolle. Tämän vuoksi näkyvä aurinkopaneelikatos voi herättää huomiota, jonka avulla kasvatetaan tietoisuutta myös kiinteistön muita energiaratkaisuja kohtaan, kuten esimerkiksi katolle sijoitettuja aurinkopaneeleita. Suomessa ei suuressa mittakaavassa ole sähköautojen latauspisteillä varustettuja aurinkopaneelikatoksia, joten ratkaisu voi todennäköisesti saada positiivista huomiota myös julkisuudessa.

7.2 Maalämmön hyödyntäminen Colosseumissa

Yhtenä hajautetun energiantuotannon vaihtoehtona kohteessa on maalämmön ja -kylmän hyödyntäminen. Vantaan kaupungin karttapalvelujen perusteella työssä on tarkistettu, että tontin alueella ei sijaitse pohjavesialuetta tai maanalaista asemakaavaa, mitkä voivat joissain tapauksissa olla maalämpökaivojen poraamisen esteenä. Rakennuksen ympärille sijoitettuna tontille mahtuu pystysuoria kaivoja 15 metrin välein noin 42 kappaletta (Kuva 27). Tarvittaessa tontille mahtuu enemmänkin kaivoja, mutta mitä pienemmälle alueelle kaivot ovat sijoitettu, sitä vähemmän maasta saadaan energiaa kaivoa kohti. Useamman kaivon kerätessä lämpöä pienemmältä alueelta maaperä viilenyy kaivojen ympäriltä nopeammin. Tämä kaivojen yhteisvaikutus tulee huomioida myös maalämpökentän mitoituksessa, koska maaperän jäähtyessä liikaa järjestelmän hyötysuhde heikkenee, jolloin pahimmillaan koko järjestelmän toiminta voi estyä kaivokentän jäätyessä. Tämän vuoksi maalämpökenttää mitoittaessa tarkastellaan, että maaperästä saatavan nesteen keskimääräinen lämpötila pysyy positiivisena jopa noin 50 vuoden ajan.



Kuva 27. Maalämpökaivojen mahdolliset sijainnit kohteen tontilla.

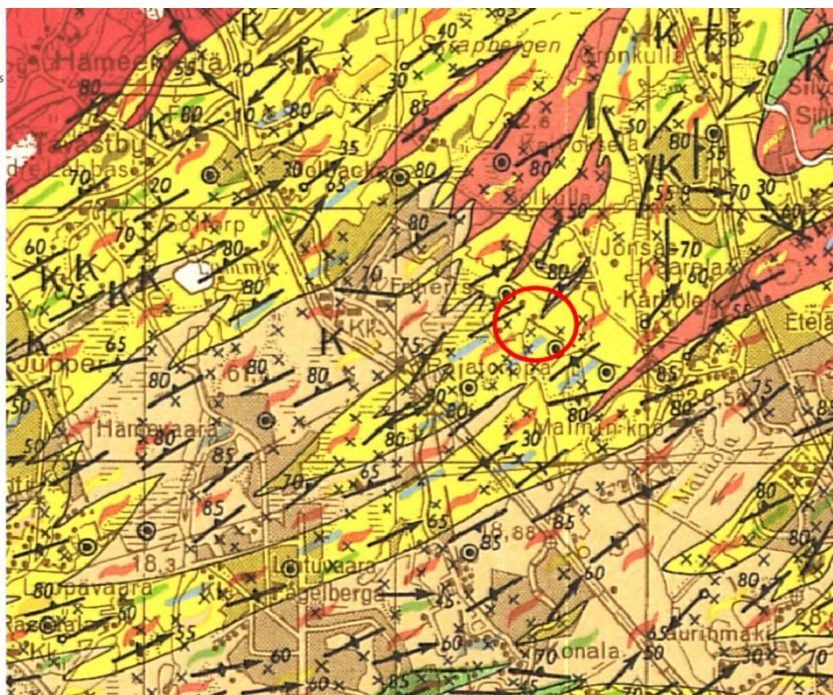
Kasvattamalla kaivojen etäisyyttä toisiinsa nähden, voidaan saatavan energian määrää kaivometriä kohden kasvattaa. Joissain tapauksissa maalämpökaivoille soveltuva tontin ala voi olla niin pieni, että maalämpöjärjestelmää ei ole järkevää asentaa. Tontin koon ollessa yleensä rajallinen mahtuu tällöin suuremmilla etäisyyksillä vähemmän maalämpökaivoja tontille. Toisaalta maalämpökaivojen etäisyyttä kasvattaessa ja käytettäessä suurempaa aluetta kaivoille, saadaan maalämpöjärjestelmällä tuotettua enemmän energiaa. Kaivojen etäisyyksien kasvaessa tulee kuitenkin rakentaa enemmän vaakaputkistoa kaivojen välille, mikä osaltaan lisää kustannuksia. Yleensä kaivojen välisen minimietäisyyden suositusarvo on noin 15 m, jota on käytetty myös tämän työn eri tarkastelutapauksissa. (Juvonen 2013 ym.) Tässä työssä kyseinen etäisyys on riittävä, koska kaivot sijoitetaan rakennuksen ympärille. Tällöin maalämpökentän ala on varsin suuri, joten niiden lämmöntuotanto kaivometriä kohti ei heikkene merkittävästi käytettäessä 15 m väliä suurempaan väliin verrattuna EED-simulointiohjelman perusteella. (EED 3.16 2010)

Alueen kallioperä on Geologian tutkimuskeskuksen paikkatietokarttojen mukaan kvartsia/maasälpägneissiä (Kuva 28), joiden lämmönjohtavuus EED-simulointiohjelman perusteella on noin 2,9 W/(mK) (Geologian tutkimuskeskus 2016) (EED 3.16 2010). Tämä arvo on hieman Suomen kallioperän keskimääräistä lämmönjohtavuuden arvoa 3,24 W/(mK) matalampi. (Wennerström ym. 2014). Kallioperän laatu ja sen lämmönjohtavuus vaikuttavat merkittävästi maalämmön mitoittamiseen, koska suuremmalla lämmönjohtavuudella kallioperä pystyy luovuttamaan paremmin lämpöä maalämpöjärjestelmän keruunesteelle.

MERKKIEN SELITYS

PINTASYNTYISIÄ KIVILAJEJA — SUPRACRUSTAL ROCKS

- Kalligneissiä
Mica gneiss
- Kalligneissiä välikerroksina
Interbeds of mica gneiss
- Kalligneissiä sulkeumina
Inclusions of mica gneiss
- Kvartsi-maasälpagneissiä
Quartz-feldspar gneiss
- Pyrokseenigneissiä
Pyroxene gneiss
- Kvartsi-maasälpagneissiä välikerroksina
Interbeds of quartz-feldspar gneiss
- Kvartsi-maasälpagneissiä sulkeumina
Inclusions of quartz-feldspar gneiss
- Amfibolittia ja metavulkanittia
Amphibolite and metavolcanics
- Uraliittiporfyriittia
Uralite porphyrite
- Amfibolittia välikerroksina
Interbeds of amphibolite
- Amfibolittia sulkeumina
Inclusions of amphibolite



Kuva 28. Kallioperän tyyppi kohteen tontilla (Geologian tutkimuskeskus 2016).

Toinen asia mikä vaikuttaa maalämmön potentiaaliin kustannustehokkuuden näkökulmasta on pehmeän maakerroksen paksuus ennen kallioperää. Pehmeän maan osuudelle joudutaan rakentamaan teräksinen suojaputki, joka estää maan sortumisen kaivoon. Tämä lisää huomattavasti kustannuksia pehmeän maan osuudella. Energiakaivojen poraus tulee siis sitä edullisemmaksi, mitä lähempänä kallioperä on maanpinnasta. Paksun pinta- maakerroksen tapauksissa tulee monesti edullisemmaksi porata tavallista syvempiä kaivoja vähemmän, jolloin pehmeän maan osuus poratuista metreistä jää pienemmäksi. Tarkasteltavan kohteen tontilla on haastatteluiden perusteella arviolta vain alle 5 m pehmeää maata ennen kallioperää, joten tämän näkökulman osalta tontti on potentiaallinen energiakaivojen sijoitukselle.

Mikäli kohteessa päädytään maalämmön hyödyntämiseen, tulee tontilla suorittaa TRT-mittaus. Mittaus tarkoittaa termistä vastetestiä, jossa simuloidaan maalämmönkeruuta käänteisesti. TRT-mittaus on aina suositeltavaa suuremmissa kohteissa, jotta todellisten lähtötietojen avulla kaivokenttä pystytään mitoittamaan tarkemmin välttämällä ali- tai yli- mitoitus. Mittauksessa yhteen testiporakaivoon pumpataan tietyllä teholla lämmitettyä keruunestettä, jonka jälkeen meno- ja paluunesteiden lämpötilaerot mitataan. Analysoimalla näitä lämpötilakäyriä pystytään määrittämään energiakaivon lämmönvastus sekä kallioperän todellinen lämmönjohtavuus. Lisäksi TRT-mittauksen avulla pystytään selvittämään myös pohjaveden virtaus porareissä. Suurempi pohjaveden virtaus hidastaa lämpökaivon jäähtymistä, joten kaivometrejä ei tarvita niin paljon verrattuna kuivem- paan lämpökaivoon. Näiden tulosten avulla voidaan maalämpökenttä mitoittaa huomattavasti tarkemmin, mikä on tärkeää varsinkin näin suuren kentän mitoituksessa. (Juvo- nen ym. 2013) (Gehlin 1998)

Maalämmön hyödyntämisen osalta tässä kohteessa merkittävimpana investointipäätök- seen vaikuttavana tekijänä on kuitenkin lämmönjakojärjestelmä, koska suoran sähkö- lämmityksen sähköpattereissa ei voida hyödyntää maalämpöä. Kohteessa nykyisellä lämmönjakojärjestelmällä voidaan periaatteessa jakaa maalämmön avulla lämmitettyä

ilmaa, mutta tällöin korvataan kaukolämpöä eikä sähkönkulutusta saada pienennettyä. E-luvun näkökulmasta kaukolämmön korvaaminen maalämmöllä aiheuttaa vain varsin pienen vaikutuksen kaukolämmön energiamuodon kertoimen ollessa 0,7 ja sähkön 1,7. (Finlex 2013/9) Maalämmön energiamuodon kertoimeksi tulee siis noin 0,5–0,6 maalämmön COP-arvon ollessa välillä 3,0–3,5.

Myös ympäristönäkökulmasta kaukolämmön korvaaminen maalämmöllä on varsin kyseenalaista. Tähän vaikuttaa tässä tapauksessa miten maalämmön tarvitsema sähköenergia on tuotettu, ja kuinka hyvällä hyötysuhteella maalämpöjärjestelmä pystyy muuttamaan sähköenergiaa lämpöenergiaksi. Luonnollisesti myös paikallisen kaukolämmön ympäristöystävällisyys vaikuttaa näiden kahden eri tuotantomuodon ekologisuuteen. Kohteessa hyödynnetään Vantaan Energian tuottamaa kaukolämpöä, josta noin puolet tuotetaan jätevoimalaitoksella. Lisäksi on mahdollista valita kaukolämpötuotteeksi ”Uusiolämpö100”, missä lämpö on 100 %:sti tuotettu jätevoimalaitoksessa. Toisaalta maalämpö-järjestelmän tarvitseman sähkön osalta voidaan yhtälailla valita tuuli-/vesisähkö, joten vertailussa on järkevämpää käyttää keskimääräisiä päästöarvoja. Vaihtoehtojen ympäristöystävällisyys riippuu vahvasti käytetystä vertailutavasta. Jos huomioidaan, että maalämpöjärjestelmät kuluttavat eniten sähköä kylmällä säällä, jolloin sähkön tuotantoon käytetään myös varavoiman energialähteenä kaasua ja kivihiiltä, käytettävä päästökerroin on tällöin korkeampi kuin sähkön keskimääräinen päästökerroin. Motiva suosittelee keskimääräiseksi päästökertoimeksi lämmityssähkön tapauksessa 400 kg CO₂/MWh (Heljo ym. 2005). Tällöin maalämpöjärjestelmän COP-arvon ollessa noin 3, on maalämmön päästökerroin 133 kg CO₂/MWh, mikä ei ole merkittävästi kaukolämmön keskimääräistä päästökerrointa 183 kg CO₂/MWh pienempi. Käytettäessä sähkön keskimääräistä päästökerrointa 209 kg CO₂/MWh laskettaessa maalämpöratkaisun päästöt laskiessa kaukolämpöön verrattuna, on maalämpö ympäristönäkökulmasta selvästi parempi vaihtoehto. Tällöin maalämmön päästökerroin on vain noin 70 kg CO₂/MWh COP-arvolla 3. (Motiva 2016i)

Tässä työssä maalämpötarkasteluun on valittu taulukossa 2 esitetyt laskentatapaukset. Lisäksi huomioidaan erikseen korvataanko tuotetulla maalämpöenergialla joko kaukolämpöä vai sähkölämmitystä, riippuen siitä uusitaanko lämmönjakojärjestelmä vesikier-toiseksi. Taulukossa 2 esitetyissä tapauksissa oletuksena on, että maalämmöllä korvataan nykyisen lämmönjakojärjestelmän avulla jaettavaa kaukolämpöä. Kaivomääränä on käytetty kaikissa tapauksissa 42 kaivoa rakennuksen ympärille sijoitettuna 15 m etäisyyksillä toisiinsa nähden. Laskentatapauksissa on tarkasteltu sekä 300 m ja 400 m syvyisiä kaivoja pintamaan syvyyden ollessa noin 5 m. Lisäksi on tarkasteltu myös yhdistetyn maalämpö- ja kylmäjärjestelmän hyödyntämistä pelkän maalämpöjärjestelmän sijaan. Taulukossa on esitetty eri vaihtoehtojen laskennallinen tehon- sekä energiantuotto.

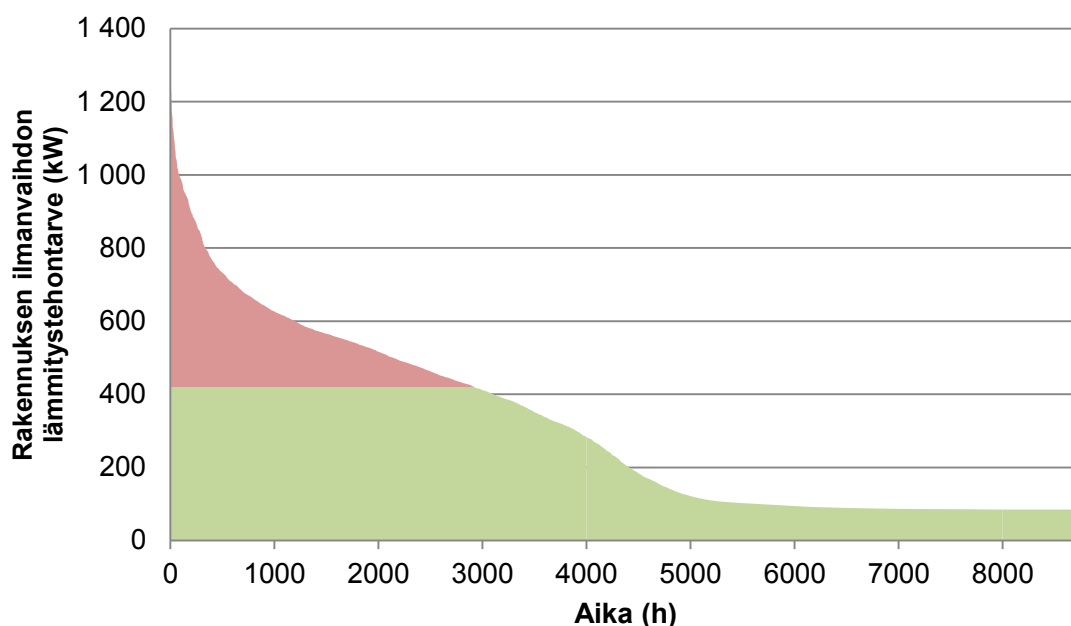
Taulukko 2. Maalämmön laskentatapaukset.

| | Tapaus 1 | Tapaus 2 | Tapaus 3 | Tapaus 4 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Kaivojen syvyys | 300 | 300 | 400 | 400 |
| Kaivojen määrä | 42 | 42 | 42 | 42 |
| Yhdistetty ML- ja MK-järjestelmä | Ei | Kyllä | Ei | Kyllä |
| ML teho | 223 | 250 | 312 | 335 |
| ML energianpeitto (KL) | 34 % | 37 % | 46 % | 48 % |
| ML energiantuotto | 1 341 | 1 488 | 1 809 | 1 923 |
| MK tehontuotto vapaajäähdytyksellä | 0 | 100 | 0 | 110 |
| MK energiantuotto vapaajäähdytyksellä | 0 | 158 | 0 | 171 |

Ensimmäisessä skenaariossa tarkastellaan kaukolämmön korvaamista maalämmöllä. Earth Energy Designer 3.16 (lyh. EED) ohjelmalla tehtyjen laskelmien mukaan 300 metrin syvyisillä energiakaivoilla saadaan tuotettua rakennuksen kaukolämmön tarpeesta noin 40 %. Mikäli porataan 400 m kaivoja, saadaan energiakaivoilla tuotettua kaukolämmön tarpeesta noin 60 %. Energiakaivokenttä on EED-ohjelmalla mitoitettu toimimaan vähintään noin 50 vuoden ajan siten, että keskimääräisen maasta tulevan nesteen lämpötila on 50 vuoden kohdalla alhaisimmillaankin 0-asteista. Tällä varmistetaan se, ettei riskiä energiakaivokentän jäätymisestä synny 50 vuoden aikana. (EED3.16 2010)

Pelkän maalämmön sijaan kohteessa on mahdollista hyödyntää yhdistettyä maalämpö- ja -kylmäjärjestelmää. Tällöin kesäaikaan järjestelmällä tuotetaan ainoastaan maakylmää. Tämän suuruisella energiakaivokentällä voidaan tuottaa maakylmän vapaajäähdytyksellä noin 100–110 kW jäähdytystehoa. (EED 3.16 2010) Loppu jäähdytystehon tarpeesta tulee kattaa kompressorijäähdytyksen avulla, sillä kaukokylmää ei Vantaan alueella ole tarjolla. Vapaajäähdytyksessä sähkönkulutus on hyvin pientä kompressorijäähdytykseen verrattuna, koska sähköä tarvitaan ainoastaan kiertopumppujen toimintaan. Vapaajäähdytyksen pienestä sähkönkulutuksesta johtuvan halvan jäähdytysenergian lisäksi maakylmän etuna on lämpöenergian lataaminen maaperään kesäaikana, joten kallioperän hitaamman jäähtymisen seurauksena lämpöenergiaa voidaan talviaikaan hyödyntää enemmän.

Koska maalämmöllä ei pyritä kattamaan rakennuksen koko energiankulutusta, kannattaa sitä hyödyntää tässä tapauksessa pelkästään ilmanvaihtolämmityksen tekemiseen. Lämmin käyttövesi kannattaa edelleen tehdä kaukolämmöllä, koska maalämpöpumpun hyötysuhde heikkenee, mitä korkeampaan lämpötilaan lämmitettävä vesi tulee pumpulla nostaa. Kuvassa 29 on esitetty maalämpöjärjestelmän pysyvyyskäyrä 400 m syvillä energiakaivoilla ilman maakylmän hyödyntämistä. Maalämpöjärjestelmän katettava lämmitystehontarve on esitetty kuvassa vihreällä. Punaisella oleva osuus on varajärjestelmällä, eli kaukolämmöllä, katettava tehontarve. (EED 3.16 2010)



Kuva 29. Rakennuksen ilmanvaihtolämmityksen pysyvyyskäyrä.

Tarkasteltaessa toista skenaariota, missä on mahdollista uusia koko lämmönjakojärjestelmä vesikiertoiseksi, voidaan maalämmöllä korvata sähkölämmitys kokonaan 400 m syvyisillä kaivoilla. Mikäli hyödynnetään 300 m kaivoja, voidaan maalämmöllä kattaa sähkölämmitys pääosin ja loput osuudesta tuotettaisiin kaukolämmöllä. (EED 3.16 2010) Yksi vaihtoehto on myös lämmönjakojärjestelmän uusimisen myötä hyödyntää ainoastaan kaukolämpöä rakennuksen lämmitykseen. Tulee kuitenkin huomioda, että remontin aikana tiloja ei voida vuokrata ja lisäksi saneerauksen investointikustannukset ovat hyvin suuret. Mikäli tehdään suuri investointi lämmönjakojärjestelmän päivittämiseen, on maalämmön potentiaali tällöin järkevää pyrkiä hyödyntämään mahdollisimman kokonaisvaltaisesti. Kiinteistön alueelle voidaan sijoittaa jopa hieman enemmän kaivoja kuin 42 kpl, vaikka energiaa ei kaivoa kohti saada aivan yhtä suurta määrää. (EED 3.16 2010) Toisaalta eräs vaihtoehto lämmönjakojärjestelmän uusimisen jälkeen on lämmitellä rakennus kokonaan kaukolämmöllä, koska tällöin selvittää pienemmillä investointikustannuksilla, mutta päästään silti eroon sähkölämmityksestä.

7.2.1 Kustannukset

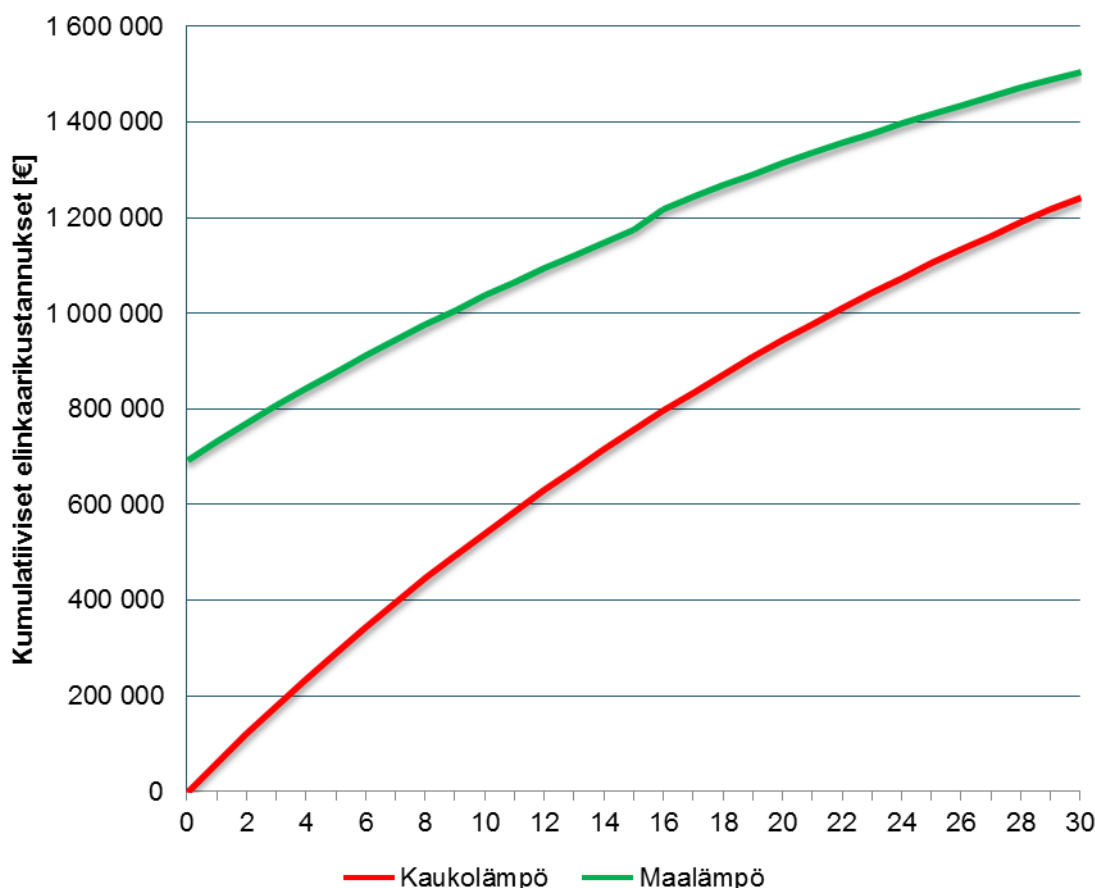
Vantaan energian kaukolämmön energiamaksun keskimääräinen hinta on kohteessa noin 45 €/MWh (ALV 0 %). Paikallinen kaukolämpöenergian hinta on siis varsin edullinen verrattuna Energiateollisuuden tilastojen kaukolämmön keskimääräiseen hintaan 57 €/MWh (ALV 0 %) vuodelta 2015. (Energiateollisuus 2016b) Lisäksi kohteessa kaukolämmön perusmaksu on noin 10,7 €/kW. Maalämpöjärjestelmän COP-arvoksi on oletettu 3,0 nykyisellä lämmönjakojärjestelmällä. Sähkön kokonaishinta on noin 90 €/MWh. Ensimmäisessä laskentatapauksessa verrataan kaukolämmön korvaamista maalämmöllä siltä osin, kuinka paljon maalämpöjärjestelmä 300 m syvyisillä kaivoilla pystyy tuottamaan lämpöä.

Viime aikoina sähkön hinta suhteessa kaukolämpöön on ollut historiallisen pieni. Tämän vuoksi tällä hetkellä tehtävät kustannusvertailut näyttäytyvät hyvin suosiollisilta maalämpöjärjestelmien näkökulmasta. Lähiaikoina monet kaukolämpöyhtiöt ovat kuitenkin havahtuneet tähän lämpöpumppujärjestelmien suosion kasvuun. Kaukolämpöyhtiöt menettävät tällöin tuloja heidän markkinaosuutensa pienentyessä. Lisäksi moniin

kiinteistöihin on asennettu päälämmitysjärjestelmäksi maalämpöjärjestelmä ja kaukolämpö varajärjestelmäksi, jolloin kaukolämpöä käytetään lähinnä kylmimpien pakkaspäivien huippulämmitys-tehontarpeen aikaan. Tämä on kaukolämpöyhtiöille epäedullista, koska he joutuvat varautumaan suureen tehontarpeeseen, mikä aiheuttaa heille suurempia investointi- sekä ylläpitokustannuksia. Kaukolämpöyhtiöt eivät kuitenkaan nykyisellä hinnoittelulla ole saaneet riittävää kompensointia tästä, sillä suuri osa heidän liikevaihdostaan tulee energiamaksujen kautta. Joten kun maalämpöä päälämmitysjärjestelmänään käyttävät asiakkaat kuluttavat vähemmän energiaa eli maksavat vähemmän energiamaksuja, mutta vaativat kuitenkin suurta lämmitystehoa, on tämä epäedullista kaukolämpöyhtiöille. Lisäksi tämä on aiheuttanut kaukolämpöyhtiöille jäähtymän heikentymistä, mikä tarkoittaa kaukolämmön meno- ja paluuveden lämpötilan erotuksen pientymistä. Tämä on myös epäedullista kaukolämpöyhtiöille, koska heikompi jäähtymä vaatii suuremman vesivirran, joten kaukolämpöverkon pumppauskustannukset nousevat. Lisäksi verkoston lämpöhäviöt kasvavat pienemmän jäähtymän seurauksena, joten hyötysuhde on myös heikompi. (Pöyry 2010b).

Tämän seurauksena yhtiöt ovat alkaneet muuttaa hinnoitteluaan. Ennen asiakasta on laskutettu energiamaksulla, tilausvesivirrasta riippuvalla maksulla sekä kiinteällä perusmaksulla. Nykyään tilavuusvesivirran sijaan monet kaukolämpöyhtiöt laskuttavat mitattujen tehoarvojen perusteella. Lisäksi perus- ja energiamaksujen saatetaan laskuttaa myös paluuveden lämpötilasta riippuvaa paluuvesimaksua. Tämänkaltaisen hinnoittelu tekee yhdessä käytettävästä maa- ja kaukolämpöjärjestelmästä varsin epäkannattavan. Tässä tapauksessa kannattaakin monesti harkita joko pelkkää kaukolämpöä tai vaihtoehtoisesti maalämpöjärjestelmää niin suurella energiapeitolla, että ainoastaan kylmimpien pakkaspäivien aiheuttamat huipputehopiikit joudutaan kattamaan sähkövastusten avulla.

Elinkaarilaskelmassa on huomioitu energiahintojen arvioitu 2,5 %:n nousu. Laskentakorkona on käytetty asiakkaan haastattelun perusteella 5 %. Tässä laskennassa on käytetty esimerkkinä tapausta 1, jossa maalämpökaivojen syvyys on 300 m ja maakylmää ei hyödynnetä. Kuvassa 30 on esitetty maalämpö- ja kaukolämpövaihtoehtojen kumulatiiviset elinkaarikustannukset. Maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika on laskennan perusteella maksa itseään takaisin 30 vuoden aikana. Myös muiden maalämpövaihtoehtojen kustannustehokkuus on lähes yhtä heikko. Pitkä takaisinmaksuaika johtuu muun muassa jo olemassa olevasta kaukolämpöjärjestelmästä, joten sen tapauksessa uusia investointikustannuksia ei synny. Lisäksi Vantaan Energian kaukolämpö on hieman Suomen kaukolämmön keskimääräistä hintaa matalampi. Myöskään alueen kallioperä ei ole lämmönjohtavuudeltaan maalämmölle ihanteellinen. Myöskään vesikiertoiseen lämmönjakojärjestelmään investoiminen ja joko maa- tai kaukolämmön hyödyntäminen sähkölämmityksen sijaan ei elinkaarikustannustarkasteluissa maksanut itseään takaisin 30 vuoden tarkasteluajan sisällä. Tämä johtuu pääosin saneerauksen suurista investointikustannuksista.



Kuva 30. Kauko- ja maalämpöjärjestelmien elinkaarikustannusvertailu nykyisellä lämmönjakojärjestelmällä ja 300 m kaivoilla.

7.3 Sisäpihan kattaminen

Energiantuotantojärjestelmien lisäksi tarkempaan tarkasteluun energiaratkaisuiden osalta on valittu myös sisäpihan kattaminen, jonka avulla voidaan säästää lämpöenergiankulutuksessa. Tarkasteltavassa kiinteistössä on kaksi kattamatonta sisäpihaa, jotka on mahdollista sulkea umpeen katteen avulla. Tällöin lämpöhäviöt sisäpihan puoleisen vaiipan osalta johtuvat katettuun sisäpihaan, jolloin sen lämpötila ilman erillistä lämmitystäkin on ulkolämpötilaa hieman lämpimämpi. Lisäksi ilman katetta tuulen aiheuttamat paine-erot lisäävät vaiipan lämpöhäviöitä vuotoilmavirran kasvaessa, kun taas katteella voidaan vähentää tuulen vaikutusta ja siten lämpöhäviöitä. (Ympäristöministeriö 2013a) Yksi vaihtoehto on kattaa sisäpiha esimerkiksi lasikatteella, jolloin auringon lämpösäteily pääsee vaikuttamaan sisäpihan lämpötilaan. Sisäpihan uudesta käyttötarkoituksesta riippuen se voidaan joko lämmitellä tarvittaessa tiettyyn peruslämpötilaan tai antaa sen lämmitä ainoastaan ympäröivien tilojen lämpöhäviöiden sekä auringon lämpösäteilyn vaikutuksesta. Lisäksi sisäpihan kattamisella saadaan mahdollista lisäasennustilaa aurinkopaneeleille. Varsinainen kate voi olla joko lasikate tai umpinainen kate-rakenne, joista molemmilla on hyvät ja huonot puolensa. Esimerkiksi umpinainen kattorakenne voi mahdollisesti vähentää käyttäjävihiä ja lisätä valaistuksen tarvetta. Toisaalta optimaaliseksi ratkaisuksi voi osoittautua myös osittain umpinainen ja osittain lasitettu katto. Lasikaton lämmöneristävyys on luonnollisesti heikompi verrattuna umpinaiseen kattorakenteeseen, mutta toisaalta lasilla katettu sisäpiha pystyy talvella vastaanottamaan auringon lämpösäteilyä sekä se myös lisää tilan viihtyisyyttä. Lasikaton rakenteelliset kestävyysvaatimukset kuitenkin edellyttävät, ettei lunta saa talvella kintua sen päälle liian paksua kerrosta. Tällöin lasikaton muoto tulee suunnitella niin, että

kinostuminen vältetään lähes kokonaan. Mikäli muotoa ei pystytä suunnittelemaan tällä tavoin, voidaan toisena vaihtoehtona lasikatto varustaa sähkövastuksilla, mikä toisaalta kasvattaa kiinteistön sähkönkulutusta. Lisäksi sulanut lumi saattaa aiheuttaa rakenteiden kostumista, joten toteutussuunnittelussa tulee varmistaa sulaneen lumen siirtyminen pois katolta hallitusti.

Katteella suljettu sisäpiha vastaa huonetilaa, mikä edellyttää rakentamismääräyskokoelman D2 mukaan ilmanvaihtoa. (Ympäristöministeriö 2011a) Ympäristöministeriön rakennusmääräyskokoelman D2 mukaan oleskelutiloissa ilmanvaihtokerroin tulee olla vähintään 0,5 1/h, eli kahden tunnin aikana tilan ilmatilavuus tulee vaihtua kokonaisuudessaan yhden kerran. Muiden tilojen osalta ilmanvaihtokerroin 0,2 1/h on riittävä. (Ympäristöministeriö 2011a) Suurempi ilmanvaihtokerroin tarkoittaa myös suurempaa puhallinsähkönkulutusta. (IDA ICE 4.7 2016) Pelkästään painovoimainen ilmanvaihto ei kuitenkaan ole riittävä, koska se edellyttää suuria korvausilma-aukkoja. Mahdollinen ratkaisu tilan ilmanvaihdoksi on asentaa koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto syrjäyttävän ilmanvaihdon periaatteella. Tällöin tuloilma ohjataan sisäpihalle tilan alaosaan ja ilma poistuu tilan yläosaan poistoilmapuhaltimien sekä katteen tuuletusaukkojen välityksellä. (Skistad 2003)

Ilmanvaihdolla voidaan vaikuttaa myös sisäpihan lämpötilaan ja tätä kautta rakennuksen lämmitys- sekä jäähdytysenergian tarpeeseen. Esimerkiksi lämmityskaudella tuuletusluukut voidaan sulkea, jotta lämpöhäviöiden seurauksena lämmenneeltä sisäpihalta siirtyy mahdollisimman vähän lämpöä ulos poistoilman mukana. Tuuletusluukut voidaan esimerkiksi ohjelmoida aukeamaan ainoastaan sisäpihan lämpötilan noustessa yli 25 asteen. Sisäpihan poistoilmanvaihdon voi toteuttaa myös koneellisesti, jolloin siitä voidaan hallitusti ottaa lämmöntalteenotolla lämpöenergiaa talteen. Tilan ylikuumenemista voidaan rajoittaa tehostamalla ilmanvaihtoa. Tällöin hyödynnetään sisäpihan ilmaa viileämpää ulkoilmaa tilan lämpötilan laskemiseksi. Etenkin ilmanvaihdon yöaikainen tehostus on suositeltavaa. Ilmanvaihdon ilmamäärien lisääminen johtaa kuitenkin puhallinsähkönkulutuksen kasvuun. (IDA ICE 4.7 2016)

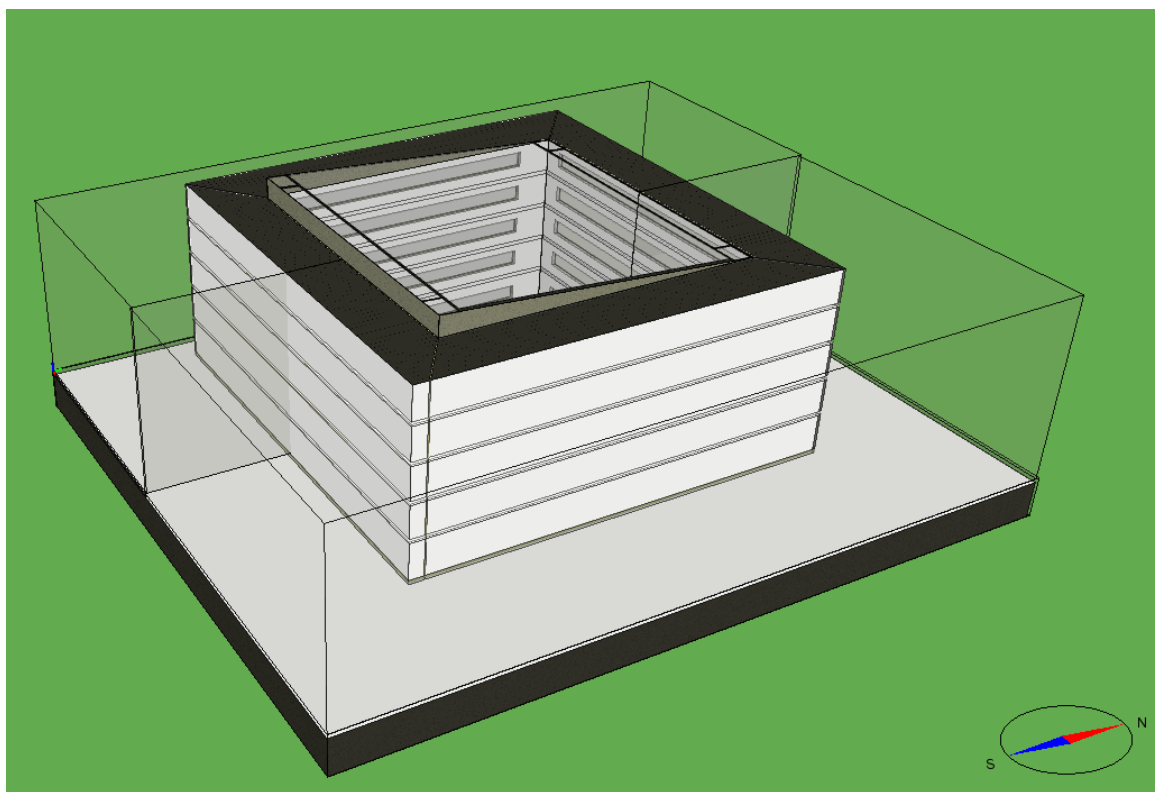
Toinen vaihtoehto tilan ylikuumenemisen estämiseen on passiivinen jäähdytys, johon voidaan vaikuttaa esimerkiksi katteen muodon ja materiaalien avulla. Passiivisia keinoja, kuten aurinkosuojausta, suositellaan esimerkiksi rakennusmääräyskokoelma D3:n mukaan ensisijaiseksi vaihtoehdoksi. (Ympäristöministeriö 2011b) Sisäpihan kate voidaan esimerkiksi kallistaa kohti pohjoista, jolloin auringon säteilyenergiaa pääsee sisäpihalle vähemmän verrattuna tasaiseen tai etelään suunnattuun katteeseen. (IDA ICE 4.7 2016) Lisäksi lasikatteeseen voidaan integroida säleät, jotka kesällä estävät liian auringon säteilyn ja täten tilan ylikuumenemisen, ja toisaalta talvella säleät ovat auki päästäen kaiken auringon säteilyn tilaan. Käytännössä näiden säätö tulee kuitenkin olla automatisoitua, mikä lyhentää niiden käyttöikää ja aiheuttaa suurempien investointikustannusten lisäksi myös lisää huoltokustannuksia. (Ympäristöministeriö 2011b) Kolmas vaihtoehto on jäähdyttää tilaa aktiivisesti jäähdytyspatteerien avulla, mikä aiheuttaa toisaalta runsaampaa sähköenergiankulutusta tehostettuun ilmanvaihtoon verrattuna. (IDA ICE 4.7 2016)

Lasikate vähentää auringonsäteilyä johtuvaa lämpökuormaa toimistotiloissa, koska säteily joutuu läpäisemään ikkunoiden lisäksi myös lasikatteen. Tällöin auringonsäteilyä pääsee toimistotiloihin vähemmän kuin ilman lasikatetta, mikä vähentää toimistotilojen jäähdytysenergian tarvetta. Toisaalta mikäli sisäpihan lämpötila pääsee kohoamaan hyvin korkeaksi, aiheuttaa tämä lämmönjohtumista sisäpihalta myös toimistotiloihin. Tä-

mä taas aiheuttaa toimistotiloihin suurempaa jäähdytysenergian tarvetta, joka voidaan välttää estämällä toimistotilojen jäähdytysenergian tarpeen merkittävä kasvu. (IDA ICE 4.7 2016)

Lasikaton asentaminen ei saa kuitenkaan vähentää käyttäjien viihtyvyyttä. Esimerkiksi jos sisäpihat vain muurataan umpeen, eikä niille keksitä järkevää käyttöä, voi tämä vaikuttaa negatiivisesti kiinteistön houkuttelevuuteen ja vähentää nykyisten käyttäjien tyytyväisyyttä. Tällä taas on negatiivinen vaikutus kiinteistön käyttöasteeseen, joten kate-
ratkaisun tulee jollain tapaa kohentaa rakennuksen imagoa tai viihtyvyyttä. Lasikatto vaikuttaa tämän suhteen kuitenkin järkevältä vaihtoehdolta, sillä katettu sisäpiha voi tarjota esimerkiksi mahdollisuuden pienimuotoiselle kahvilatoiminnalle keväästä syksyyn. Tällöin tilan sisäilmastoon tulee kuitenkin kiinnittää enemmän huomiota, sillä oleskelu tilassa on todennäköisesti pitempiä aikoja. Vaikka kattaminen ei välttämättä tuo lisäarvoa sisäpihan käyttötarkoitukseen, tässä työssä tutkitaan, voidaanko sen avulla vähentää sähköenergiankulutusta säilyttäen samanaikaisesti sisäilmaston viihtyvyys sisäpihan puoleisissa toimistotiloissa.

Jotta sisäpihan kattamisen vaikutuksia voidaan tarkastella kokonaisvaltaisesti, huomioiden muun muassa säätökijät, rakenteiden termiset ominaisuudet, ilmanvaihdon ilmavirrat sekä vuotoilmavirrat, on sisäpihasta ja sen ympäröivistä rakenteista tehty yksinkertaistettu malli dynaamisella laskentamenetelmällä IDA ICE 4.7 ohjelman avulla. Mallissa on huomioitu muun muassa sisäpihan ikkuna-ala, rakennuksen alla sijaitseva parkkihalli, sekä sisäpihan että sitä ympäröivän rakennuksen oikeat mittasuhteet. Kuvassa 31 on esitetty kyseinen malli, johon sisäpihan lasikate on mallinnettu. Lasikate on tässä mallissa suunnattu kaltevasti pohjoiseen noin 10 asteen kaltevuuskulmalla, jolla voidaan passiivisesti vähentää auringonsäteilyä johtuvaa tilan kesäaikaista yllilämpenemistä. (IDA ICE 4.7 2016)



Kuva 31. Yksinkertaistettu IDA ICE-malli katetusta sisäpihasta. (IDA ICE 4.7 2016)

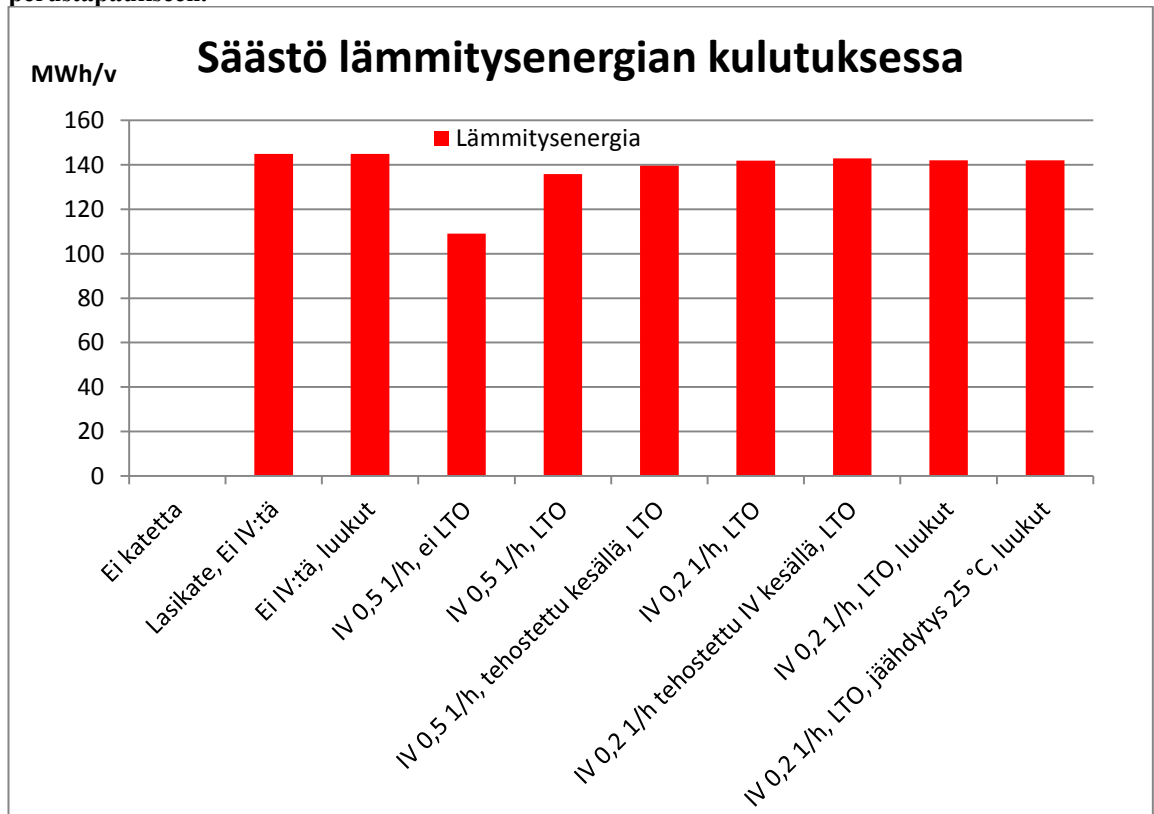
Laskentatapauksia on IDA:lla simuloitu 10 eri kappaletta. Ensimmäinen tapaus kuvastaa nykyistä tilannetta ilman sisäpihan katetta. Tähän perustapaukseen verrataan muita vaihtoehtoja, joissa on esimerkiksi tarkasteltu luukkujen, lämmöntalteenottojärjestelmien sekä ilmanvaihtokertoimen vaikutusta sisäpihan energiataseeseen. Perustapausta luukuun ottamatta, kaikki muut tapaukset sisältävät pohjoiseen viistosti asennetun lasikateen. Taulukossa 3 on esitetty kaikki IDA:lla simuloidut laskentatapaukset. (IDA ICE 4.7 2016)

Taulukko 3. IDA ICE:lla simuloidut sisäpihan laskentatapaukset.

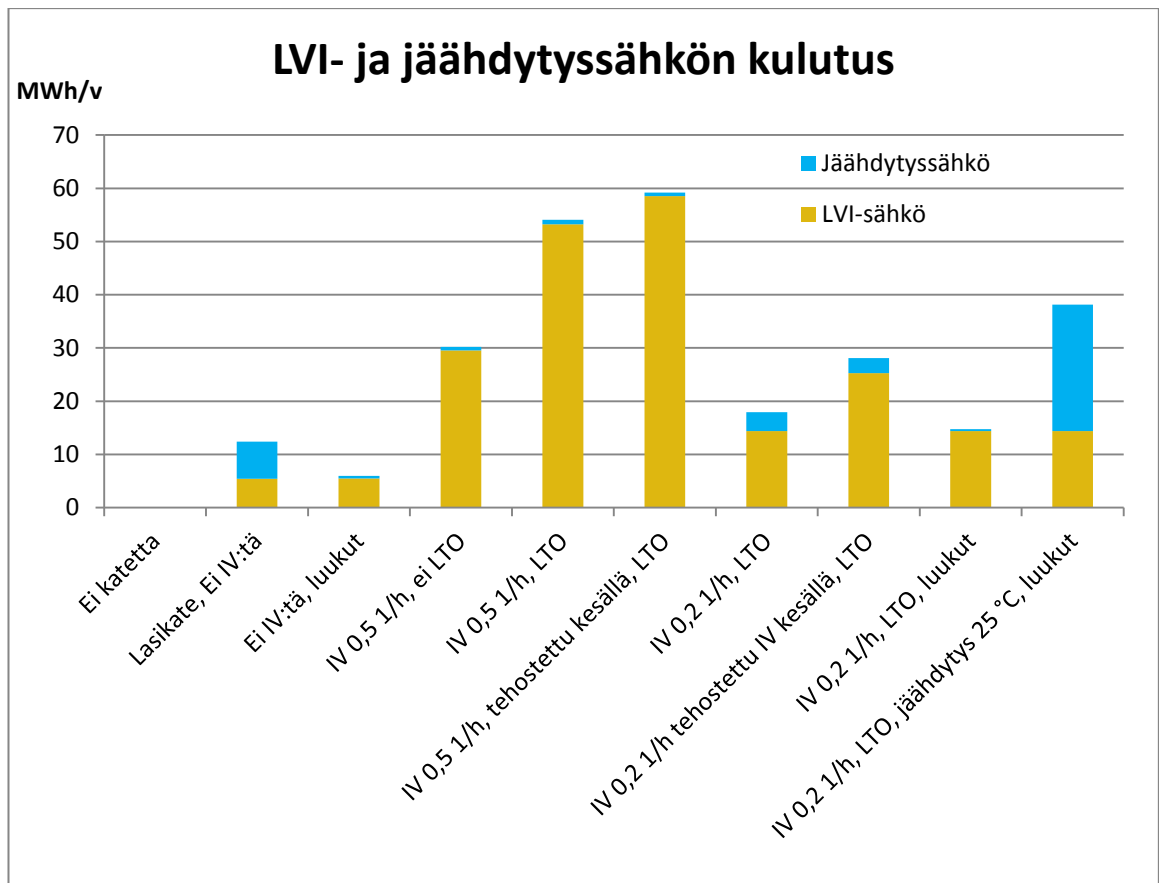
| Laskentatapaus |
|--|
| 1. Ei katetta |
| 2. Lasikate, Ei IV:tä |
| 3. Ei IV:tä, luukut |
| 4. IV 0,5 1/h, ei LTO |
| 5. IV 0,5 1/h, LTO |
| 6. IV 0,5 1/h, tehostettu kesällä, LTO |
| 7. IV 0,2 1/h, LTO |
| 8. IV 0,2 1/h tehostettu IV kesällä, LTO |
| 9. IV 0,2 1/h, LTO, luukut |
| 10. IV 0,2 1/h, LTO, jäähdytys 25 °C, luukut |

Kuvassa 32 on esitetty eri tarkasteluvaihtoehtojen vaikutus vuotuisen lämmitysenergiankulutukseen verrattuna nykyiseen kattamattomaan sisäpihaan. Sisäpihan kattamisella voidaan laskennan perusteella saada säästöä lämmitysenergiankulutuksessa laskentatapauksesta riippuen noin 110–145 MWh vuodessa. Katevaihtoehtoista selvästi pienin säästö saadaan ilmanvaihtokertoimella 0,5 1/h ilman lämmöntalteenottoa. Tällöin sisäpihan ulkoilmaa lämpimämpää ilmaa siirtyy ilmanvaihdon mukana eniten sisäpihan ulkopuolelle. Laskennan perusteella voidaan päätellä, että lämmitysenergiaa säästetään vähemmän suuremmilla ilmanvaihdon ilmamäärillä ja lämmöntalteenottojärjestelmän puuttuessa. (IDA ICE 4.7 2016)

Kuva 32. Sisäpihavaihtoehtojen vaikutus lämmitysenergiankulutukseen verrattuna perustapaukseen.

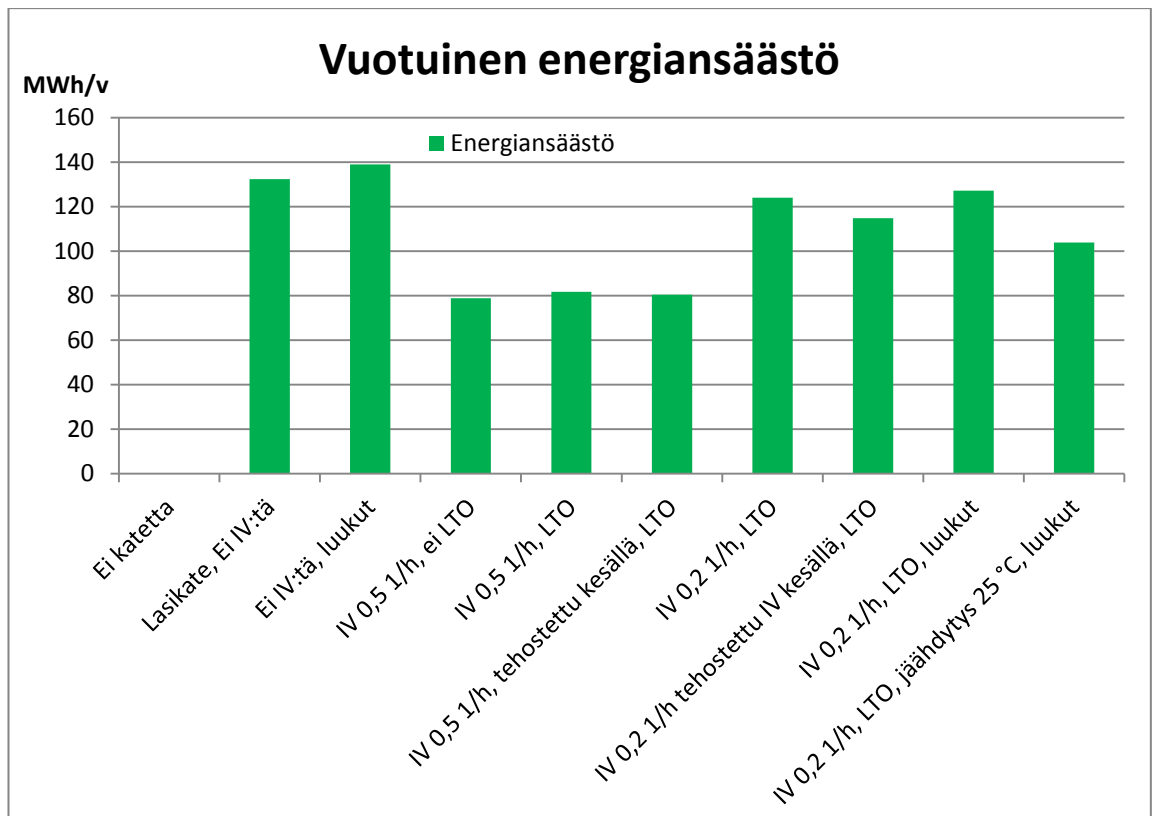


Kuvassa 33 on esitetty eri tarkasteluvaihtoehtojen vaikutus vuotuisen LVI- sekä jäähdytys­sähkön kulutukseen verrattuna nykyiseen kattamattomaan sisäpihaan. Ainoastaan viimeisessä tapauksessa sisäpihaa jäähdytetään aktiivisesti, minkä vuoksi jäähdytys­sähkön määrä on suuri verrattuna muihin laskentatapauksiin. Muissa tapauksissa jäähdytys­sähkö kuvaa lasikatteen aiheuttamaa vaikutusta toimistotilojen jäähdytystarpeeseen. Tällöin ainoastaan laskentatapauksessa, jossa ei ole ilmanvaihtoa eikä avautuvia luukkuja, jäähdytysenergiaa kuluu yli 5 MWh. LVI-sähköä kuluu selvästi eniten tapauksissa, joissa ilmanvaihtokertoimenä on 0,5 1/h. (IDA ICE 4.7 2016)



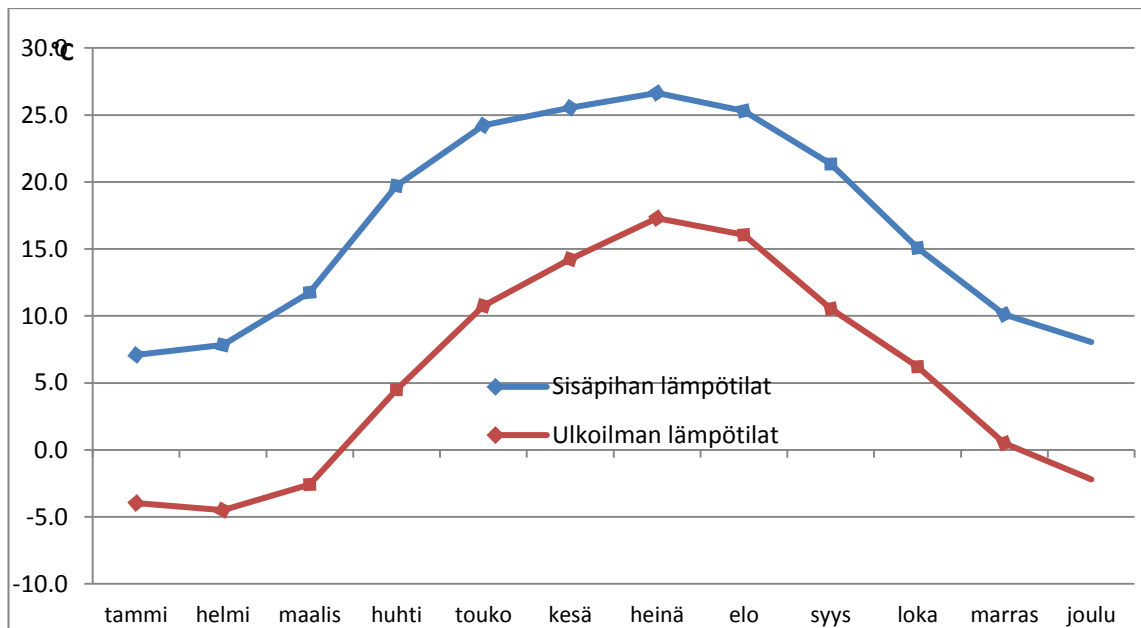
Kuva 33. Sisäpihavaihtoehtojen vaikutus LVI- ja jäähdytyssähkönkulutukseen verrattuna perustapaukseen.

Kuvassa 34 on esitetty eri tarkasteluvaihtoehtojen vaikutus vuotuiseen energiataseeseen verrattuna nykyiseen kattamattomaan sisäpihaan. Vaikutus on suuruusluokaltaan 80–140 MWh vuodessa tapauksesta riippuen. Suurin energiansäästö saadaan, kun tilassa ei ole asennettuna ilmanvaihtoa. Nämä laskentatapaukset ovat kuitenkin esitetty vertailun vuoksi, eivätkä ne ole realistisia, koska ne eivät täytä määräyksiä. (Ympäristöministeriö 2011a) Vähiten energiansäästöä saadaan vaihtoehtoilla, joissa on käytetty suurempaa ilmanvaihtokerrointa. (IDA ICE 4.7 2016)



Kuva 34. Sisäpihavaihtoehtojen vaikutus energiataseeseen verrattuna perustapaukseen

Kuvassa 35 on esitetty simuloinnin avulla saadut kuukausitason keskimääräiset lämpötilat sisäpihalla ulkoilmaan verrattuna. (IDA ICE 4.7 2016) (Ilmatieteenlaitos 2016) Taulukosta nähdään, että sisäpihan keskimääräiset lämpötilat kuukausitasolla ovat läpi vuoden noin 10 astetta ulkoilmaa korkeammat. Sisäpihan maksimilämpötila oleskeluvyöhykkeellä noin 1,2 m korkeudella on simuloinnin perusteella ilman aktiivista jäähdytystä elokuun alussa 32–35 astetta tarkasteluvaihtoehdosta riippuen. (IDA ICE 4.7 2016) Vaikka sisäpihan oleskelutasolla lämpötila ei nousisikaan liian korkeaksi sisäpihan käyttötarkoitukseen nähden, tulee tarkasteluissa huomioida katetun sisäpihan aiheuttama lämpökuorma kesäaikaan sisäpihan puoleisille toimistorakennuksille. Sisäpihan ylikuumenemisen estämiseksi osaan simulointitapauksista on lisätty pienet tuuletusluukut katteen jokaiseen kulmaan, mitkä aukeavat aina lämpötilan noustessa sisäpihan yläosassa yli 25 asteen. Mallin avulla on tutkittu myös tapausta, jossa hyödynnetään aktiivista jäähdytystä, jotta sisäpihan oleskeluvyöhykkeen lämpötila saadaan säilytettyä alle 25 asteen. Tällöin vuotuinen jäähdytysenergian tarve on noin 24 MWh suurempi perustapaukseen verrattuna. Parhaiten soveltuva laskentatapa riippuu sisäpihan tulevasta käyttötarkoituksesta. Jos hetkittäinen lämpötilan nouseminen yli 30 asteen ei ole käyttötarkoitusta haittaavaa, on todennäköisesti vaihtoehto 0,2 1/h ilmanvaihtokertoimella ja luukuilla riittävä. (IDA ICE 4.7 2016)



Kuva 35. Sisäpihan kuukausitason keskimääräiset lämpötilat ulkoilmaan verrattuna.

Sisäpihan lämmennyttilä ilmaa voidaan periaatteessa hyödyntää myös rakennuksen tuloilman esilämmitykseen. Tällöin säästetään enemmän lämmitysenergiaa, koska sisäpihan lämpöhäviöillä ja auringon säteilyllä lämmennyt ilma pystytään hyödyntämään aiempaa tehokkaammin. Toisaalta tekninen toteutus on monimutkaisempaa, koska sisäpihan ilmanvaihto tulee tällöin kytkeä samaan ilmanvaihtojärjestelmään toimiston kanssa. Lisäksi määräystekniset seikat hankaloittavat sisäpihan ilman hyödyntämistä toimistotilojen tuloilman esilämmityksessä. Esimerkiksi rakentamismääräyskokoelman D2 mukaan ulkoilmaa ei saa ottaa sellaisen rakenteen tai rakennusosan kautta, mikä heikentää ilmanlaatua. (Ympäristöministeriö 2011a) Ilmanlaatu todennäköisesti heikentyy sisäpihan kautta kulkiessaan, joten näiden perustelujen vuoksi sisäpihan ilman hyödyntäminen ilmanvaihdon esilämmityksessä on rajattu pois tarkemmista laskentatarkasteluista.

7.3.1 Kustannukset

Sisäpihan kattamisen investointikustannus on arviolta noin 200 000–250 000 € huomioiden itse katteen kustannuksen lisäksi muun muassa ilmanvaihtojärjestelmästä aiheutuvat kustannukset. Katteen asennustöistä ei todennäköisesti aiheudu merkittävää haittaa vuokralaisille, korkeintaan pientä väliaikaista meluhaittaa. Sisäpihan lasikaton huolto ja puhtaanapito aiheuttavat myös säännöllisesti kustannuksia. Lisäksi lasikattoa tarkemmin suunniteltaessa tulee varmistaa lasikaton huoltamisen toteutus. Mikäli sisäpihalle ei mahdu tuomaan henkilönostinta, tulee esimerkiksi lasikaton ala- ja yläpuolelle asentaa huoltokelkka. (Sepponen ym. 2013) Toisaalta tällöin sisäpihan investointi ja huoltokustannukset nousevat. Koska tiedetään, että toimistojen sähkölämmitys menee päälle ulkolämpötilan laskiessa alle 2,5 astetta, on IDA ICE:lla tehtyjen simulointien perusteella laskettu, että kattamisella saatava säästö lämmitysenergiassa on lähes kokonaan säästöä sähkölämmityksestä. (IDA ICE 4.7 2016) Tämän perusteella on pystytty laskemaan saavutettava säästö vuotuisissa energiakustannuksissa. Säästö on noin 11 000 € vuodessa, mikäli laskentatapauksena on katettu sisäpiha, jossa hyödynnetään tulo- ja poistoilmanvaihtoa 0,2 l/h ilmanvaihtokertoimella. Mielenkiintoisen katevaihtoehdosta tekee se, että tarkastelujen perusteella sisäpihan puoleiset toimistotilat eivät tarvitse sähkölämmitystä lähes ollenkaan. Tällöin mahdollisuudeksi tulee sähköpattereiden poistaminen näistä tiloista, millä taas on vaikutusta kiinteistön houkuttelevuuteen vuokramarkkinoilla.

8 Monikriteerimalli

8.1 Monikriteerianalyysi

Yhä yleistyvänä trendinä kiinteistön investointien päätöksenteossa korostuvat rahallisen näkökulman lisäksi myös kiinteistötalouden näkökulma, johon liittyy esimerkiksi kiinteistön imago, joka vaikuttaa sen houkuttelevuuteen vuokramarkkinoilla. Vertailtaessa useita eri vaihtoehtoja useista näkökulmista, hankaloittavat eri parametrien epävarmuus ja epätarkkuus saataviin tuloksiin perustuvaa päätöksentekoa. Eräs ongelma on myös parametrien erilaisuus, mikä tekee niiden keskenään vertaamisesta hankalaa. Tämän vuoksi on tärkeää yhteismitallistaa vaihtoehdot keskenään vertailukelpoisiksi.

Eräs tapa vertailla vaihtoehtoja eri näkökulmista on hyödyntää monikriteerianalyysia päätöksenteon tukena. Monikriteerianalyysin avulla voidaan vertailla useiden vaihtoehtojen paremmuusjärjestystä huomioimalla mallissa käytettävät eri tarkastelunäkökulmat, eli kriteerit. Monikriteerianalyysissa kriteerit voivat olla niin laskennallisia kuin sanallisia. Laskennalliset kriteerit voidaan määrittää laskemalla lähtötietojen perusteella, kuten esimerkiksi CO₂-päästöt. Sanalliset kriteerit tulevat olla jollain tavalla määritettävissä, ja esimerkiksi vaihtoehtojen vaikutus kiinteistön houkuttelevuuteen voidaan määrittää asiantuntijapaneelia hyödyntämällä. Monikriteerianalyysissa näitä kriteereitä voidaan korostaa eri paino-arvoilla. Kriteerit voidaan myös asettaa samanarvoisiksi, mikä onkin yleisin painotusmetodi. Monikriteerimetodeista yleisimmin käytettyjä on analyytinen hierarkiaprosessi, jossa ongelma kuvataan hierarkiapuun muodossa. Tämän jälkeen eri osien painotukset määritetään ja lopuksi prosessin johdonmukaisuus tarkistetaan. Monikriteerimalli selkeyttää päätösprosessia, koska malli esittää yksiselitteisesti mitä tarkastelukriteereitä käytetään tulosten saavuttamiseksi. Monikriteerimalli luo selkeät kehykset tarpeellisen informaation keräykselle sekä prosessoinnille. Ainoastaan oleelliset näkökulmat huomioidaan mallissa, koska päätöksentekijä voi antaa epäoleellisille kriteereille painoarvoksi nollan. (Wang ym. 2009)

Yleensä monikriteerianalyysia hyödynnetään joko yksinään tai kustannus-hyötysanalyysien tukena. Yksi esimerkki yksinkertaisesta monikriteerimallista on tau-lukko, jossa esitetään eri vaihtoehdot sekä niitä koskevat kriteerit. Tässä työssä tehdään kuitenkin edellä mainittua syvällisempi monikriteerianalyysi, jossa vaihtoehtoja vertailaan tarkemmin keskenään. Monikriteerianalyysissa laskentametodeina voidaan käyttää esimerkiksi painotettua summaa, sumean joukon metodiikkaa tai prioriteettien määrittystä. Monikriteerianalyysi kuitenkin vaatii päätöksentekijöiltä eri kriteerien painoarvojen määrittystä. Tämä on monesti haasteellista, sillä osa kriteereistä mitataan esimerkiksi euroissa, kun taas osa kriteereistä on pehmeitä arvoja, jotka kuvastavat ratkaisun myötä saavutettavia hyötyjä kiinteistön houkuttelevuuteen vuokramarkkinoilla. Lisäksi joissain tapauksissa päätöksentekijä ei halua kertoa omia preferenssejään, koska ei välttämättä halua julkistaa mielipidettään eri kriteereiden suhteen. Lisäksi julkisessa päätöksenteossa on yleensä useita asianomaisia, mikä tekee päätösprosessista vaikeampaa. (Wang ym. 2009)

8.2 SMAA-mallin kuvaus

Kriteerien ollessa hyvin epävarmoja sekä vaikeasti vertailtavia keskenään, voidaan hyödyntää stokastista monikriteeriarvostusanalyysia (SMAA). SMAA:n avulla voidaan saada varsin luotettavaa informaatiota eri vaihtoehdoista sekä niiden paremmuusjärjestyksistä. Lisäksi SMAA-menetelmän avulla voidaan tuottaa lisäinformaatiota päätöksenteon tueksi, vaikka päätöksentekijältä ei saadakaan riittävästi tietoa kriteerien paino-

arvoista toisiinsa nähden. SMAA-malli selventää, miten eri kriteerien painotukset vaikuttavat tarkasteluvaihtoehtojen hyväksyttävyyteen.

SMAA-mallia voidaan käyttää erilaisten päätösmallien perusteella. Tässä työssä sovelletaan lineaarista hyöty/arvofunktiota. Siinä kunkin vaihtoehdon i hyvyyttä mitataan hyötyarvolla, joka lasketaan painotettuna keskiarvona kriteeriarvoista $u_i = \sum_j w_j x_{ij}$. Tässä x_{ij} on vaihtoehdon i kriteerin j arvo ja w_j on kriteerille j määrätty paino. Kriteeriarvot on skaalattu välille $[0,1]$ siten, että 0 on huonoin ja 1 on paras arvo. Painot ovat ei-negatiivisia, ja ne on skaalattu niin että niiden summa on 1 (eli 100 %).

SMAA-malli on stokastiseen eli sattumanvaraiseen simulointiin perustuva monikriteerimalli. SMAA-mallissa epätarkka, epävarma tai osittain puuttuva tieto liittyen kriteereihin ja niiden arvottamiseen (eli painottamiseen) huomioidaan esittämällä lähtötiedot todennäköisyysjakaumien avulla. Sen sijaan että käytettäisiin tarkkoja kriteeriarvoja x_{ij} ja painoja w_j , kriteeriarvot esitetään todennäköisyysjakaumalla $f_X(\mathbf{x})$ ja painot jakaumalla $f_W(\mathbf{w})$. Puuttuvan painottamistiedon tapauksessa SMAA on käytännössä käänteinen monikriteerianalyysi. Perinteisessä monikriteerianalyysissä malli määrää parhaan vaihtoehdon tarkkojen kriteerien mittausten ja painotusten perusteella. SMAA-mallissa puolestaan voidaan tarkastella millä kriteerien painotuksella jokin ratkaisu saa jonkin tietyn sijaluvun. Esimerkiksi malli antaa vastauksen kysymykseen, miten kriteereitä tulee painottaa, jotta vaihtoehto A saa todennäköisimmin sijaluvun 1. Tämän vuoksi SMAA-mallissa ei ole pakollista saada päätöksentekijöiltä kriteerien painoarvoja ollenkaan. Päätöksentekijät voivat antaa preferenssinsä kriteereiden suhteen monin eri keinoin. Kriteerit voidaan asettaa esimerkiksi tärkeysjärjestykseen tai ne voidaan muilla tavoin suhteuttaa toisiinsa nähden. SMAA-mallissa voidaan myös yhdistää useamman päätöksentekijän paino-arvot. (Lahdelma ym. 2001) Tässä työssä analyysia varten lasketaan tulokset sekä päätöksentekijän antamilla painokertoimilla että ilman niitä.

SMAA-mallia on hyödynnetty käytännössä muun muassa lukuisissa haastavissa ympäristöpäätöksenteon hankkeissa, kuten esimerkiksi voimalaitosten sekä satama-alueiden suunnittelussa. Mallia on hyvä käyttää perinteisten vertailumenetelmien tukena, koska sen avulla voidaan herättää ajatuksia liittyen esimerkiksi siihen, ovatko tietyt ratkaisut todellisuudessa parhaimpia vaihtoehtoja. SMAA-mallin tulosten perusteella voidaan myös analysoida, ovatko mitatut vaihtoehdot määritetty riittävän tarkasti ja ovatko kriteerien painoarvot määritetty järkevästi. (Lahdelma ym. 2001)

8.2.1 Käytetty monikriteerimalli

Tässä työssä hyödynnetään Aalto-yliopiston insinöörityöiden korkeakoulun professori Risto Lahdelman SMAA-työkalua, joka suoritetaan Monte Carlo-simulointia hyödyntämällä lukuisten satunnaistapausten kautta. Monte Carlo-simulaatio voidaan tietokoneen avustuksella suorittaa nopeasti jopa suurille malleille, ja se antaa vastauksen muutamien desimaalin tarkkuudella. Simulaatiossa toistetaan samankaltaisia laskelmia useita kertoja peräkkäin muuttamalla jokaisessa laskelmassa lähtötietoinformaatiota hieman. Simulaatiota varten määritellään aina rajat, joille lähtötietoarvot voivat sijoittua. Tämän jälkeen informaatio generoidaan ja sillä suoritetaan simulaatiot. Simulaation tulosten perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä eri tarkasteluvaihtoehtoista. (Lahdelma ym. 2001)

8.2.2 Kriteerien vaatimukset

Monikriteerianalyysimallissa kriteereillä on kolme eri täytettävää vaatimusta, jotta mallia voidaan pitää käyttökelpoisena. Ensimmäiseksi kriteerin täytyy olla määritettävissä,

eli sen tulee olla joko laskennallinen tai vaihtoehtoisesti ratkaisuiden arvot kyseisen kriteerin näkökulmasta tulee määrittää esimerkiksi asiantuntijakyselyllä. Toinen tärkeä ehto kriteereille on niiden riippumattomuus toisistaan. Mikäli tietyt kriteerit ovat selkeästi toisistaan johdannaissia, painottuu niiden arvo virheellisesti liian merkitsevästi mallissa, eikä tällöin tulosten perusteella pystytä tekemään realistisia johtopäätöksiä. Kolmas oleellinen ehto kriteereille on, että niiden tulee olla mielekkäitä sekä hyödyllisiä päätöksentekijän näkökulmasta, sillä muuten ne voivat vääristää mallin tulosta. Toisaalta jos päätöksentekijältä saadaan kriteereiden painoarvot, voi hän asettaa epäolennaisien kriteerien arvoksi nollan. (Lahdelma ym. 2001)

8.3 SMAA-mallin tuottamat tulokset

8.3.1 Sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit

Hyväksyttävyyssindeksit kuvaavat sitä, millä todennäköisyydellä kyseinen vaihtoehto painottuu tietyllä sijalle tarkasteltavien vaihtoehtojen kesken. Indeksillä siis havainnollistetaan, kuinka suuri osuus eri preferenssivaihtoehdoista antaa kyseiselle vaihtoehdolle tietyn sijaluvun, kun Monte Carlo-simuloinnilla laskelmia toistetaan lukuisia kertoja kriteerien mittauksia ja painoarvoja hieman muutellen. Hyväksyttävyyssindeksit ilmaistaan usein prosenttilukuina välillä 0–100 %, ja jonkin vaihtoehdon saadessa suurimman prosenttiluvun ensimmäisen sijaluvun kohdalla, on tämä yleensä kaikki tarkastelunäkökulmat huomioiden suurimmalla todennäköisyydellä ratkaisuvaihtoehdoista paras. Sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit voidaan määrittää numeerisesti moniulotteisella integraalilla huomioiden painokertoimet yhtälöllä (2) seuraavasti (Lahdelma ym. 2001):

$$b_i^r = \int_{x \in X} f_X(x) \int_{w \in W_i^r(x)} f_W(w) dw dx \quad (2)$$

b_i^r = hyväksyttävyyssindeksi vaihtoehdolle i sijaluvulla r
 $W_i^r(x)$ = painot w jotka asettavat vaihtoehdon i sijaluvulle r
 r = sijaluku

8.3.2 Keskeiset painotusvektorit

Keskeiset painotusvektorit kuvaavat sitä, millä kriteerien painotuksilla tietty vaihtoehto on vertailussa sijalla N . Keskeiset painotusvektorit kertovat sen, millaiset kriteerien painotusjakaumat suosivat juuri kyseistä vaihtoehtoa. Keskeinen painotusvektori voidaan laskea numeerisesti moniulotteisena integraalina huomioiden kriteerijakaumat sekä ensimmäistä sijoitusta suosivat painokertoimet yhtälöllä (3) seuraavasti (Lahdelma ym. 2001)

$$w_i^c = \int_{x \in X} f_X(x) \int_{w \in W_i^1(x)} f_W(w) w dw dx / b_i^1 \quad (3)$$

w_i^c = keskeinen painotusvektori vaihtoehdolle i

8.3.3 Uskottavuusindeksi

Uskottavuusindeksi kuvaa sitä, millä todennäköisyydellä tietty painotusvektori tekee kyseisestä vaihtoehdosta hyväksyttävimmän. Uskottavuusindeksin avulla saadaan selville ovatko käytetyt lähtötiedot tarpeeksi tarkkoja realististen johtopäätösten muodostamista varten. Tämän perusteella voidaan tarvittaessa tehdä tarkempia mittauksia uskottavampien johtopäätösten saavuttamiseksi. Toisaalta uskottavuusindeksi voi jo aiemmassa vaiheessa kertoa, että lähtötietoja ei tarvitse enää merkittävästi tarkentaa. Käy-

tännössä uskottavuusindeksien arvot riippuvat siitä, kuinka suuria vaihteluvälejä mitta-uksille on käytetty mallin lähtötiedoissa. Uskottavuusindeksi lasketaan numeerisesti yhtälöllä (4) seuraavasti (Lahdelma ym. 2001):

$$p_i^c = \int_{x \in X: \text{rank}(i, x, w_i^c) = 1} f_X(x) dx \quad (4)$$

p_i^c = uskottavuusindeksi vaihtoehdolle i

$\text{rank}(i, x, w_i^c)$ = funktio joka palauttaa vaihtoehdon i sijaluvun

8.3.4 Parittainen voittoindeksi

Parittainen voittoindeksi c_{ik} kertoo millä todennäköisyydellä vaihtoehto i on parempi kuin vaihtoehto k . Voittoindeksit lasketaan simuloinnin ohessa frekvenssinä siitä, kuinka usein vaihtoehto i oli parempi kuin vaihtoehto k .

Hyväksyttävyyksindeksit ja keskeiset painokertoimet antavat päätöksentekijälle informaatiota miten kriteerien painottaminen eri tavalla tuottaa tiettyjä ratkaisuita ja tärkeimpänä havainnollistavat sen, mitkä tarkasteluvaihtoehdoista ovat hyväksyttävimpiä muihin verrattuna. Parittaista voittoindeksiä voidaan käyttää jos pitää valita kahdesta vaihtoehdosta se, kumpi toteutetaan. Keskeiset painokertoimet auttavat päätöksentekijää ymmärtämään painotusten vaikutukset, minkä myötä päätöksentekijä voi jälkeensä myös tarkentaa kriteerien painotuksia. Uskottavuusindeksi kertoo ovatko lähtötiedot tarpeeksi tarkkoja uskottavien johtopäätösten tekemistä varten. Tämän perusteella voidaan tarvittaessa tehdä tarkempia mittauksia uskottavampien johtopäätösten saavuttamiseksi. Toisaalta uskottavuusindeksit voivat jo aiemmassa vaiheessa kertoa, että lähtötietoja ei tarvitse enää merkittävästi tarkentaa. Eli vaikka jokin vaihtoehto vaikuttaa kärkivaihtoehdolta, tulee huomioida myös mitä uskottavuusindeksit kuvaavat. Esimerkiksi vaihtoehto A3 voi sijoittua sijalle 1. 20 % todennäköisyydellä, mutta toisaalta se voi myös sijoittua viimeiselle sijalle 15 % todennäköisyydellä. Tällöin kyseisen vaihtoehdon uskottavuusindeksi on heikko, minkä seurauksena kyseinen vaihtoehto putoaa pois parhaiden ratkaisuiden joukosta olettaen muiden ratkaisujen uskottavuusindeksien olevan korkealla tasolla. (Lahdelma ym. 2001)

8.4 Monikriteerimallin tarkasteluvaihtoehdot

Taulukossa 5 on esitetty monikriteerimalliin valitut tarkasteluvaihtoehdot. Osa energia-ratkaisuihin rajattiin pois tarkemmista laskelmista jo luvussa 5, missä tarkasteltiin eri hajautettujen energiantuotantojärjestelmien soveltuvuutta tutkittavaan kohteeseen. Osa vaihtoehdoista jätettiin pois samankaltaisuuden vuoksi. Esimerkiksi maalämpövaihtoehdoista jätettiin pois yhdistetyn maalämmön- ja kylmän järjestelmät, sillä ne eivät merkittävästi eroa malliin valituista vaihtoehdoista. Sisäpihan kattamisen osalta malliin valittiin useista laskentatapauksista vaihtoehto, jossa käytettiin 0,2 l/h ilmanvaihtokerointia sekä tuuletusluukkuja. Laskennassa tarkastellaan kahta eri skenaariota, joista ensimmäisessä huomioidaan kaikki 10 eri vaihtoehtoa. Toisessa skenaariossa laskennasta rajataan pois lämmönjakojärjestelmän saneerausta edellyttävät vaihtoehdot A8-A10.

Taulukko 4. Monikriteerimalliin valitut tarkasteluvaihtoehdot.

| | |
|------------|---|
| A1 | Aurinkopaneelit 720 m ² |
| A2 | Aurinkopaneelit 1 110 m ² |
| A3 | Aurinkopaneelit 1 110 m ² + julkisivuilla 200 m ² |
| A4 | Aurinkopaneelikatot |
| A5 | Sisäpihan kattaminen |
| A6 | Maalämpö 300 m (nykyinen lämmönjakojärjestelmä) |
| A7 | Maalämpö 400 m (nykyinen lämmönjakojärjestelmä) |
| A8 | Maalämpö 300 m (vesikiertoinen lämmönjakojärjestelmä) |
| A9 | Maalämpö 400 m (vesikiertoinen lämmönjakojärjestelmä) |
| A10 | Kaukolämpö (vesikiertoinen lämmönjakojärjestelmä) |

8.5 Valintakriteerit

Valintakriteereinä tässä analyysissä käytetään vaihtoehtojen sisäistä korkokantaa, E-lukuvaikutusta, CO₂-päästövähennystä sekä arvonlisäystä kiinteistön houkuttelevuuteen vuokramarkkinoilla, josta käytetään termiä houkuttelevuus. Näistä kriteereistä kaikki muut ovat laskennallisia paitsi houkuttelevuuskriteeri, joka arvotetaan eri vaihtoehtojen välillä teettämällä kysely alalla toimiville henkilöille.

Houkuttelevuuskriteeri on tärkeää mitata, koska sillä voidaan vaikuttaa kiinteistön käyttöasteeseen. Tämä on päätöksentekijälle tärkeämpää kuin esimerkiksi energiaratkaisun takaisinmaksuaika, sillä vaikka jokin ratkaisu maksaa itsensä takaisin hyvin nopeasti, eivät sen tuotot korvaa puoliksi tyhjiä tiloista aiheutuvia tulonmenetyksiä. Tämän vuoksi kiinteistönomistaja on valmis tekemään merkittäviäkin investointipäätöksiä, mikäli niiden myötä pystytään parantamaan kiinteistön asemaa vuokramarkkinoilla.

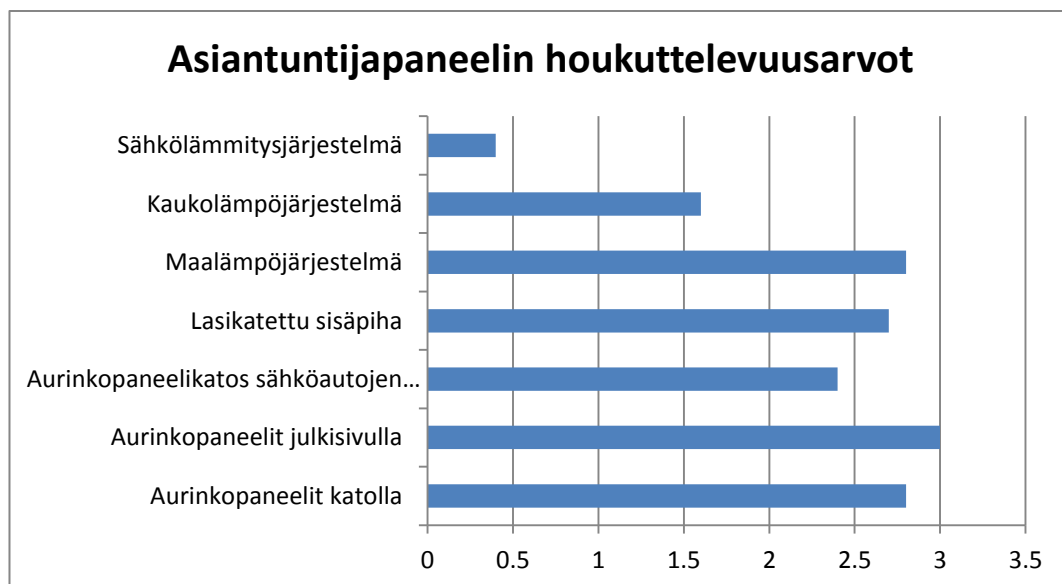
Laskenta suoritetaan sekä painottamalla kriteereitä kiinteistönomistajan edustajan antamilla painoarvoilla (yhteensä 100 %) että ilman kriteerien erillisiä painotuksia, jolloin kaikkia kriteereitä painotetaan tasajakaumalla kaikilla mahdollisilla tavoilla. Kiinteistönomistajan edustaja on antanut houkuttelevuuskriteerille painoarvoksi 50 %. Seuraavaksi tärkein valintakriteeri kiinteistönomistajalle on tarkasteluvaihtoehdon tuottavuus painoarvolla 30 %, mitä mitataan mallissa sisäisen korkokannan avulla. Tässä huomioidaan ratkaisun koko elinkaaren aikainen tuottavuus. Kolmas kriteeri on ratkaisun vuotuinen CO₂-päästöjen vähennysvaikutus ja neljäs kriteeri ratkaisun E-lukua pienentävä vaikutus. Molemmat kriteerit ovat saaneet päätöksentekijältä painoarvoksi 10 %. Kriteerit vaikuttavat osaltaan myös kiinteistön imagoon vuokramarkkinoilla, missä nämä kriteerit mittaavat tiettyä laskennallista arvoa. Houkuttelevuuskriteeri taas viittaa ratkaisuiden näkyvyyden kautta saatavaan houkuttelevuuden lisäykseen vuokramarkkinoilla.

Haitta vuokralaiselle voi olla kriittinen tekijä energiaratkaisun soveltuvuutta arvioitaessa. Tarkasteluvaihtoehdoista lähinnä lämmönjakojärjestelmän saneeraus on niin suurta haittaa aiheuttava, että tällöin tilojen tulee olla tyhjiillään remontin aikana. Haittaa vuokralaiselle ei kuitenkaan valittu kriteeriksi, koska laajamittainen saneeraus joko tilantees-

ta riippuen on mahdollista tai ei ole mahdollista. Tämän vuoksi haitta vuokralaiselle olisi huono kriteeri. Tämän sijaan malliin tehtiin 2 eri skenaariota, jotta päätöksentekijällä on mahdollisuus tarkastella tilanteesta riippuen realistisia tuloksia.

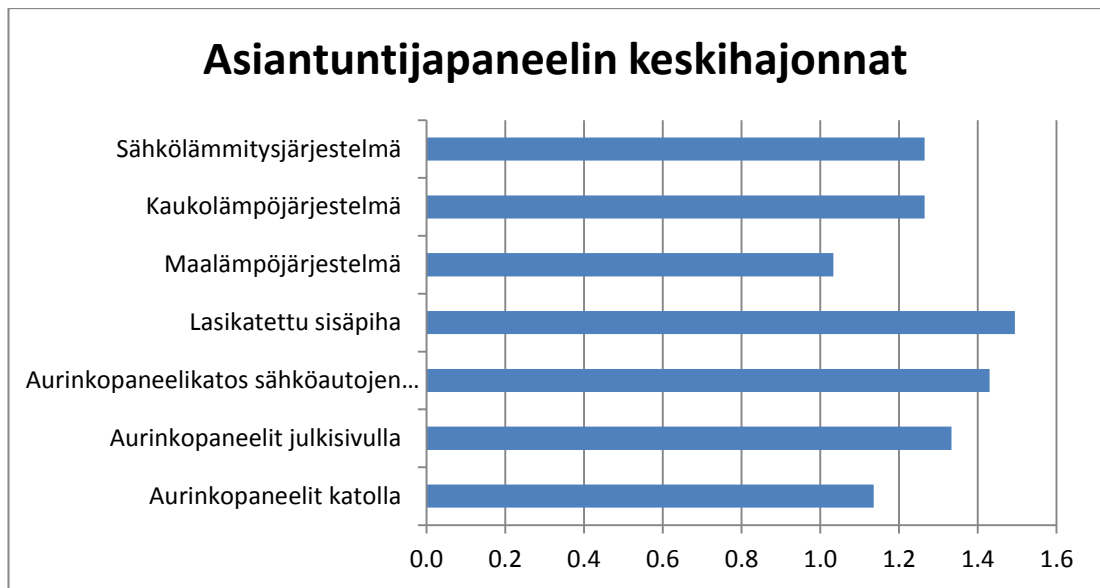
8.5.1 Houkuttelevuuskriteeri

Monikriteerimallin kriteereistä kaikki muut ovat laskennallisia arvoja, paitsi houkuttelevuuskriteeri. Tämän takia se on määritetty tässä työssä asiantuntijapaneelin avulla. Asiantuntijapaneeli on toteutettu sähköisen kyselyn muodossa hyödyntämällä SurveyPal-ohjelmistoa. Kyselyn käytettävyys on tehty mahdollisimman miellyttäväksi, jotta se kannustaa vastaamiseen. Monikriteerimallin vaihtoehtoja jouduttiin yksinkertaistamaan joidenkin vaihtoehtojen osalta, jotta vältettiin liian monimutkainen kysely. Esimerkiksi aurinkopaneelimäärien erisuuruisten maalämpö ja sähkölämmitys hybridijärjestelmien sijaan kyselyssä on kysytty vain houkuttelevuusvaikutusta maa- ja kaukolämmölle sekä sähkölämmitykselle. Vastausten perusteella on määritetty lopulliset houkuttelevuusarvot monikriteerimalliin. Esimerkiksi maalämpö- ja sähkölämmityshybridijärjestelmän arvo määritettiin näiden erillisten lämmitysmuotojen kyselyn houkuttelevuusarvojen keskiarvona. Monikriteerimallissa käytetyille kahdelle eri kokoluokan aurinkosähköjärjestelmälle on molemmille käytetty samaa houkuttelevuusarvoa, joka kuvastaa asiantuntijapaneelin yleistä käsitystä katolle asennettavien aurinkosähköjärjestelmien houkuttelevuudesta järjestelmien koosta riippumatta. Kysely lähetettiin yhteensä 22 henkilölle ja vastauksia saatiin yhteensä 10 kappaletta. Kyselyyn valitut henkilöt ovat asiantuntijoita toimistorakennusten arvottamisessa. Kuvassa 36 on esitetty kyselyn vastauksien keskiarvot. Lisäksi liitteessä 1 on esitetty asiantuntijapaneelin tulokset eriteltyinä sisältäen myös vastausten keskihajonnat. Liitteessä esitetyt keskihajonnat eroavat työssä käytetyistä keskihajonnoista, koska ne ovat ilmoitettu olettaen asiantuntijapaneelin edustavan koko populaatiota.



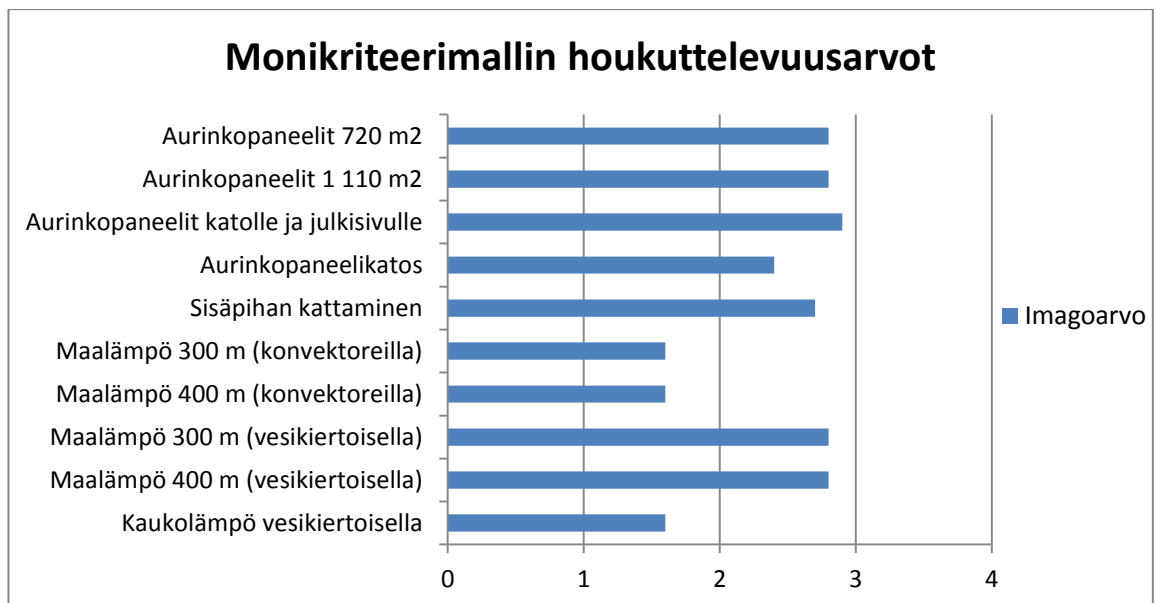
Kuva 36. Asiantuntijapaneelin avulla määritetyt arvot vaihtoehtojen houkuttelevuudelle.

Kuvassa 37 on esitetty vaihtoehtojen keskihajonnat asiantuntijapaneelissa. Keskihajonta on laskettu olettaen, että kyselyyn vastanneet asiantuntijat eivät edusta koko populaatiota. Suurin keskihajonta on aurinkopaneelikatoksella ja pienin keskihajonta on maalämpöjärjestelmällä.



Kuva 37. Asiantuntijapaneelin keskihajonnat

Kyselyn perusteella monikriteerimallin vaihtoehtoilta on määritetty seuraavat arvot (Kuva 38). Esimerkiksi yhdistetty sähkölämmitys- ja maalämpöjärjestelmä sai houkuttelevuusarvoksi erillisen sähkölämmityksen ja maalämmön houkuttelevuusarvon keskiarvon. Tämä on perusteltua, koska yhdistetty järjestelmä ei ole houkuttelevuusvaikutukseltaan pelkän maalämpöjärjestelmän veroinen. Yhdistetyllä järjestelmällä huoneisiin on edelleen sijoitettuna näkyvät sähköpatterit, jotka vaikuttavat negatiivisesti houkuttelevuusarvoon. Kaksi erisuuruista aurinkopaneelijärjestelmää taas ovat näkyvyydeltään oletettu samanarvoisiksi, joten myös niiden houkuttelevuusarvo on määritetty samaksi.



Kuva 38. Monikriteerimallin tarkasteluvaihtoehtoilta määritetyt houkuttelevuusarvot.

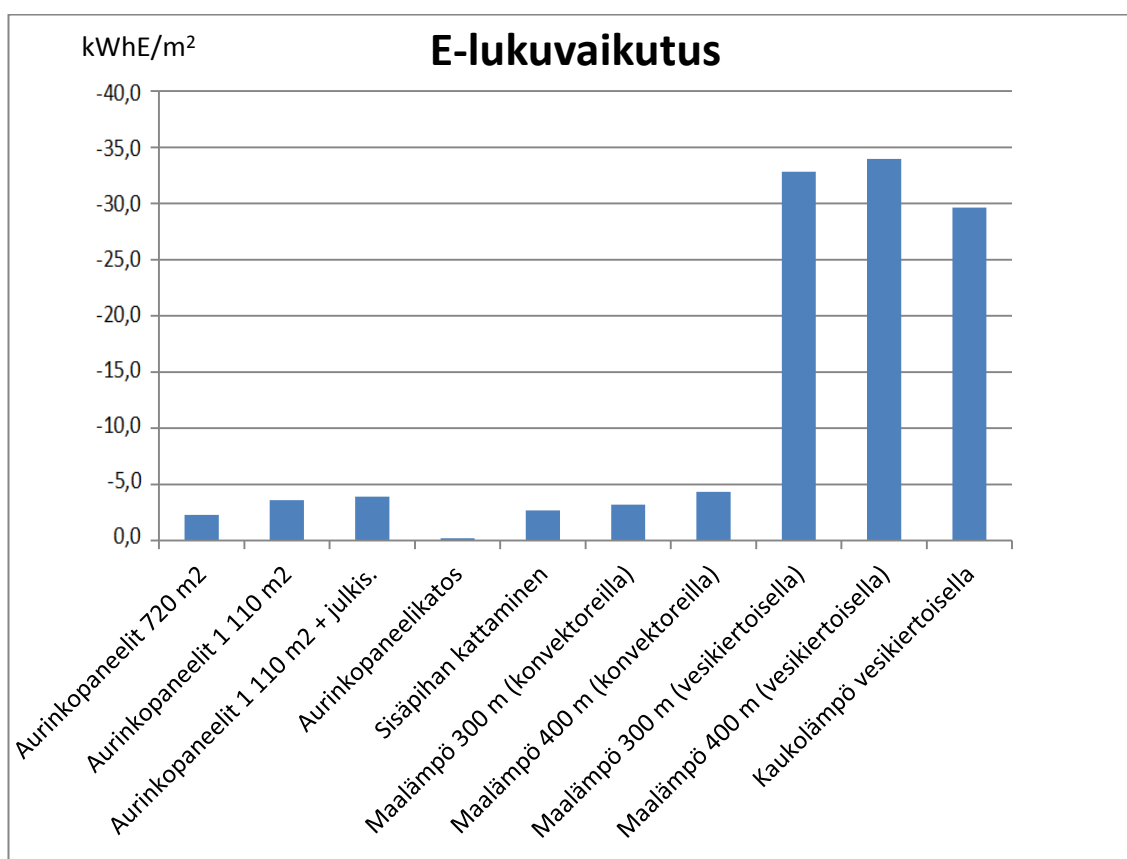
8.5.2 E-luku

Rakennuksen E-luku on määritetty viimeaikaisen rakennuksessa toteutetun energiatehokkuusprojektin yhteydessä. Rakennuksen nykyinen E-luku on 187, joten rakennus kuuluu kuvan 39 mukaisesti D-luokkaan. Rakennuksen suuren pinta-alan johdosta esimerkiksi aurinkopaneelita tarvitaan tarkasteluiden perusteella yli 5000 m², mikäli halutaan saavuttaa seuraavaksi parempi energiatehokkuusluokka C.

| Energiatehokkuusluokka | Kokonaisenergiankulutus, E-luku (kWh _E /m ² vuosi) |
|------------------------|---|
| A | E-luku ≤ 80 |
| B | 81 ≤ E-luku ≤ 120 |
| C | 121 ≤ E-luku ≤ 170 |
| D | 171 ≤ E-luku ≤ 200 |
| E | 201 ≤ E-luku ≤ 240 |
| F | 241 ≤ E-luku ≤ 300 |
| G | 301 ≤ E-luku |

Kuva 39. Toimistorakennusten energiatehokkuusluokat (Ympäristöministeriö 2013b).

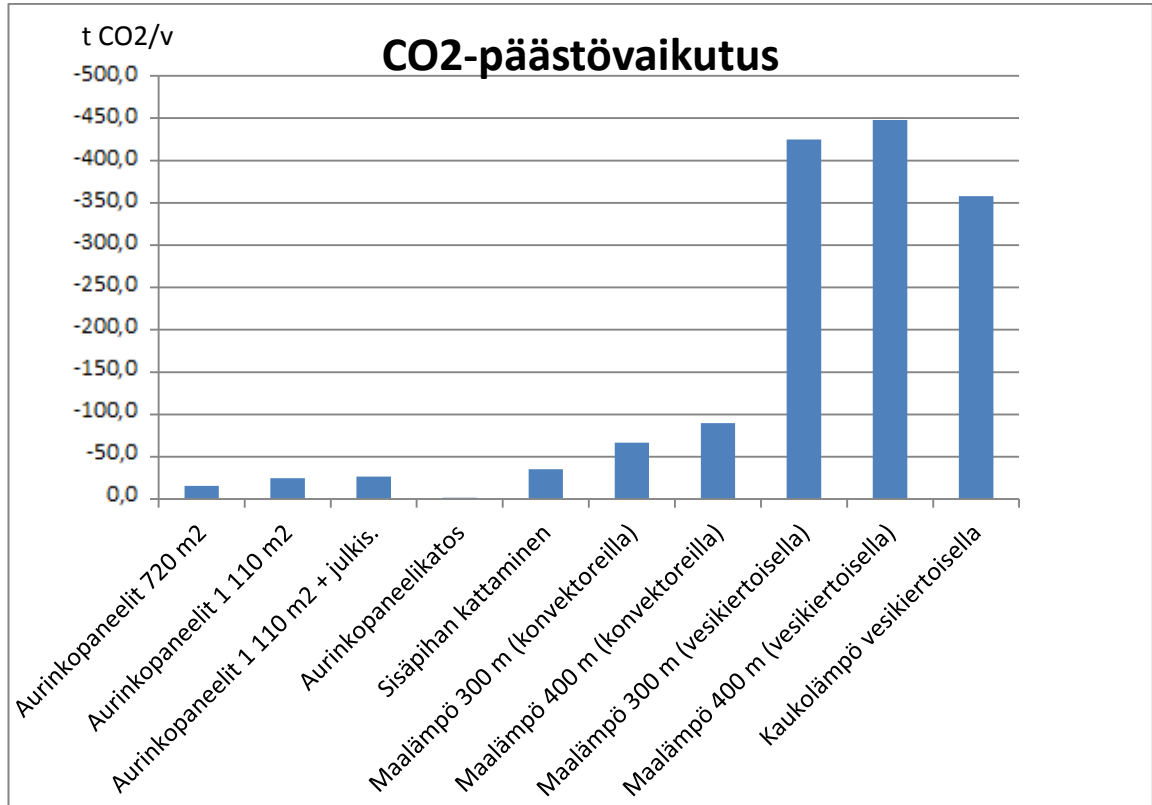
Kuvassa 40 on esitetty tarkasteltujen toimenpiteiden vaikutukset rakennuksen E-lukuun. Tarkastelujen perusteella suurin E-lukuvaikutus voidaan saavuttaa yhdistetyllä maalämpö- ja kylmäjärjestelmällä 400 m syvyisillä kaivoilla, jolla korvataan kaikki nykyinen lämmityssähkö sekä osittain myös kaukolämpöä. Tämä vaihtoehto tosin vaatii lämmityksen jakojärjestelmän saneerauksen vesikiertoiseksi, mikä aiheuttaa korkeat investointikustannukset. Myös muut saneerausvaihtoehdot, kuten vesikiertoinen maalämpöjärjestelmä 300 m syvyisillä kaivoilla tai kokonaan vesikiertoinen kaukolämpö pienentävät E-lukua merkittävästi. Kaikilla saneerausvaihtoehdoilla päästään energiatehokkuusluokkaan C. Muita selkeästi pienemmän E-lukuvaikutuksen omaavia vaihtoehtoja ovat esimerkiksi sisäpihan kattaminen sekä aurinkopaneeleiden asentaminen rakennuksen katolle, eikä näillä vaihtoehdoilla saavuteta parempaa energiatehokkuusluokkaa. E-luvun näkökulmasta parhaimmat vaihtoehdot ovat sähkönkulutuksen karsiminen korvaamalla sähkönkulutusta muulla tuotannolla tai energiatehokkuutta parantamalla.



Kuva 40. Ratkaisuvaihtoehtojen E-lukuvaikutus.

8.5.3 Päästövähennykset

Kuvassa 41 on esitetty eri tarkasteluvaihtoehtojen vuotuisia CO₂-päästöjä vähentävät vaikutukset. Myös päästövähennysten osalta saneerausvaihtoehdot tuottavat suurimmat päästövähennykset. CO₂-päästökertoimet perustuvat Motivan julkaisemiin päästöker-toimiin, jotka perustuvat Suomen keskimääräisiin arvoihin. (Motiva 2016i) Lämmitys-sähkölle on huomioitu tämän mukaan oma päästökerroin. (Heljo ym. 2005)



Kuva 41. Tarkasteluvaihtoehtojen CO₂-päästövaikutukset.

8.5.4 Sisäinen korkokanta

Monikriteerimallin yhtenä kriteerinä halutaan mitata vaihtoehdon rahallista tuottavuutta. Tätä mittaamaan on valittu sisäinen korkokanta (IRR). Sisäinen korkokanta valittiin nettonykyarvon sijaan, koska sisäisen korkokannan tulokset ovat helpommin luettavissa ja vertailtavissa keskenään. Sisäiset korkokannat ovat laskettu 20 vuoden pitoajalla. Lisäksi sisäisen korkokannan laskennassa on huomioitu seuraavat asiat:

- Inflaatio 2,0 %, Euroopan keskuspankin tavoite (ECB 2016)
- Energian hinnan nousu 2,5 %, tilastojen perusteella (Tilastokeskus 2016) (Energiateollisuus 2016c)
- Aurinkopaneelien vuotuinen tehon heikentyminen 0,5 % (Fraunhofer 2014)

Sisäinen korkokanta lasketaan nettonykyarvon yhtälöstä (5) yleensä iteroimalla, kun nettonykyarvoksi asetetaan nolla (Lehtonen 2004):

$$NPV = \sum_{i=1}^k \frac{(T_i - K_i)}{(1+r)^i} = 0 \quad (5)$$

NPV = investoinnin nettonykyarvo (€)

T_i = investoinnista aiheutuvat tulot vuonna i (€)
 K_i = investoinnista aiheutuvat kulut vuonna i (€)
 r = korkokanta

Taulukossa 5 on esitetty mallin lähtötietoina käytettyjen tarkasteluvaihtoehtojen sisäiset korkokannat. Katolle asennettavien aurinkopaneelijärjestelmien sisäiset korkokannat ovat korkeimpia, matalin korkokanta on aurinkopaneelikatoksella.

Taulukko 5. Tarkasteluvaihtoehtojen sisäiset korkokannat.

| Vaihtoehto | IRR |
|--|------|
| Aurinkopaneelit 720 m ² | 3 % |
| Aurinkopaneelit 1 110 m ² | 3 % |
| Aurinkopaneelit 1 110 m ² + julkis. | 1 % |
| Aurinkopaneelikatoks | -9 % |
| Sisäpihan kattaminen | -2 % |
| Maalämpö 300 m (konvektoreilla) | -5 % |
| Maalämpö 400 m (konvektoreilla) | -4 % |
| Maalämpö 300 m (vesikiertoisella) | -2 % |
| Maalämpö 400 m (vesikiertoisella) | -2 % |
| Kaukolämpö vesikiertoisella | -1 % |

8.6 Laskennan epävarmuudet

Laskennassa on huomioitu epävarmuudet jokaiselle tarkastelukriteerille sekä kriteerien painoarvoille. Kriteerien painoarvojen suhteen epävarmuutena on käytetty +/- 5 prosenttiyksikköä, koska painoarvot saatiin 10 prosenttiyksikön tarkkuudella olettaen, että painoarvojen antajan on hankalaa määrittää painoarvot tätä tarkemmin.

Kriteerien tulosten osalta epävarmuus johtuu niiden laskentaparametrien epävarmuudesta. Houkuttelevuuskriteeriä lukuun ottamatta kaikkien kriteerien tuloksiin vaikuttaa energialaskennan epävarmuus. E-lukukriteerin sekä CO₂-päästövähennyskriteerin osalta energialaskennan epävarmuus on ainoa epävarmuutta aiheuttava tekijä. Esimerkiksi E-lukulaskennassa lopputulokseen vaikuttaa energialaskennan lisäksi ainoastaan rakennuksen pinta-ala sekä energiamuotojen kertoimet, jotka ovat laissa säädettyjä vakioarvoja.

Suurinta suhteellista epävarmuutta aiheuttavat houkuttelevuusarvojen epävarmuudet, jotka perustuvat kyselytutkimuksen vastausten standardiepävarmuuteen eli keskihajontaan. Keskihajontaa on perusteltua käyttää epävarmuutena, sillä se kuvaa hyvin sitä, kuinka lopullinen arvo voi koostua hyvin erilaisista vastauksista. Tällöin pienempi epävarmuus on esimerkiksi maalämpövaihtoehdoilla, joiden keskihajonta on pieni. Keskihajonta eli standardipoikkeama laskettiin jokaisen vaihtoehdon vastausjakauman perusteella niiden varianssin neliöjuurena. Varianssina käytettiin otosvarianssia, missä kyseiset vastaukset ovat vain otos koko populaation vastauksista eivätkä suoraan kuvaa koko populaation varianssia. Laskettaessa epävarmuus varianssin neliöjuurena, on tulosten perusteella epävarmuus houkuttelevuuskriteerin suhteen varsin suuri. Houkuttelevuuskriteerillä on laskennassa suurin painoarvo, jolloin SMAA-mallin laskennan lopputuloksiin välittyy varsin vahvasti houkuttelevuusarvojen epävarmuus.

Sisäisen korkokannan epävarmuus koostuu sen funktioon vaikuttavista tekijöistä, joita ovat energialaskennan epävarmuus, arvioidun energiahinnan epävarmuus sekä arvioitujen investointikustannuksien epävarmuus. Taulukossa 6 on esitetty näiden parametrien suhteelliset epävarmuudet kaikkien vaihtoehdojen suhteen.

Taulukko 6. IRR-kriteerin parametrien suhteelliset epävarmuudet.

| Vaihtoehto | | Energia | Hinta | Investointi |
|------------|---|---------|-------|-------------|
| A1 | Aurinkopaneelit 720 m ² | 2 % | 1 % | 5 % |
| A2 | Aurinkopaneelit 1 110 m ² | 2 % | 1 % | 5 % |
| A3 | Aurinkopaneelit 1 110 m ² + julkisivuille 200 m ² | 2 % | 1 % | 5 % |
| A4 | Aurinkopaneelikatot | 2 % | 1 % | 5 % |
| A5 | Sisäpihan kattaminen | 6 % | 1 % | 5 % |
| A6 | Maalämpö 300 m (nykyinen lämmönjako) | 2 % | 1 % | 5 % |
| A7 | Maalämpö 400 m (nykyinen lämmönjako) | 2 % | 1 % | 5 % |
| A8 | Maalämpö 300 m (vesikiertoinen lämmönjako) | 2 % | 1 % | 5 % |
| A9 | Maalämpö 400 m (vesikiertoinen lämmönjako) | 2 % | 1 % | 5 % |
| A10 | Kaukolämpö (vesikiertoinen lämmönjako) | 0 % | 1 % | 5 % |

Aurinkoenergiavaihtoehtojen osalta energian epävarmuutena on käytetty 2 %. Tämä perustuu siihen, että vuotuinen auringon säteilymäärän epävarmuus on Saksassa noin 4 % vuodessa (BP Solar 2006). Koska Etelä-Suomessa vuotuinen säteilymäärä on lähes

sama kuin Saksassa, niin vuotuisen säteilymäärän vaihtelun on myös oletettu olevan samaa luokkaa. (Motiva 2016j). Tulee kuitenkin huomioida, että vuotuisten säteilymäärien ovat keskenään riippumattomia, joten 20 vuoden laskentajaksolla niiden epävarmuudet osittain kumoavat toisiaan. Tällöin epävarmuutena yhdelle vuodelle tulee käyttää vuotuisen säteilymäärän epävarmuuden neliöjuurta, jolloin epävarmuus on 2 %.

Sisäpihan kattamisen energialaskennan epävarmuus perustuu Kaleman ym. (2008) tutkimukseen. Tutkimuksessa IDA ICE ohjelman arvot ovat eronneet muiden energialaskentaohjelmien keskiarvosta noin 6 % lämmitysenergian osalta. Jäähdytysenergian osalta epävarmuus on tätä suurempi, johtuen muun muassa auringon säteilyn vuotuisen vaihtelun suuremmasta suhteellisesta vaikutuksesta jäähdytysenergian tarpeeseen. Jäähdytysenergian osuus valitun sisäpihan laskentatapauksen osalta on kuitenkin mitättömän pieni verrattuna lämmitysenergian tarpeeseen, joten epävarmuutena on käytetty lämmitysenergian epävarmuutta. (Kalema ym. 2008)

Vesikiertoisen kaukolämpöjärjestelmän tapauksessa energiantuoton epävarmuus on nol-la, sillä kaukolämpöverkostosta saadaan käytännössä aina tarvittava energiamäärä. Maalämmön energiantuotannon osalta merkittävä virhettä aiheuttava tekijä on kallioperän lämmönjohtavuus. Maalämpölaskennassa hyödynnettävien lämmönjohtavuusarvojen epävarmuus on 2–4 %. (Peltoniemi ym. 1995) Käyttämällä keskimäärin 3 %:n epävarmuutta lämmönjohtavuudessa, aiheutuu varsinaiseen maalämpöjärjestelmän tuottoon noin 2 %:n epävarmuus, jota on käytetty työn laskentaepävarmuutena maalämmön osalta. (EED 3.16 2010)

Investointikustannusarvot sisältävät myös epävarmuutta, joka voi vaihdella huomattavastikin. Investointikustannusten epävarmuudelle ei tässä työssä löydetty selvää tieteellistä perustaa, joten epävarmuudeksi oletettiin 5 %. Lisäksi energian hintakehitykselle on oletettu noin 1 % epävarmuus perustuen Tilastokeskuksen ja energiateollisuuden hintatietoihin sähkön ja kaukolämmön osalta (Tilastokeskus 2016) (Energiateollisuus 2016c). Noin 1 % epävarmuus on perusteltua, sillä energian hintakehitystä on vaikeaa ennustaa tätä tarkemmin.

Sisäisen korkokannan funktioon vaikuttava epävarmuus koostuu siis kolmen eri parametrin epävarmuuksista. Jotta voidaan huomioida näiden parametrien yhdistetty vaikutus sisäisen korkokannan funktioon, tulee ratkaista funktion osittaisderivaatat kyseisten parametrien suhteen. Kertomalla parametrien epävarmuudet niiden osittaisderivaatoilla ja laskemalla nämä neliöllisesti yhteen, saadaan sisäisen korkokannan yhdistetty epävarmuus määritettyä jokaiselle eri tarkasteluvaihtoehdolle. (Hiltunen ym. 2012) Sisäisen korkokannan funktion määrittämisen ollessa hankalaa, laskettiin osittaisderivaattojen arvot numeerisesti pienellä dx :n arvolla derivaatan yhtälöstä (6) eri parametrien sekä kaikkien laskentavaihtoehtojen suhteen (Weisstein 2016):

$$\frac{df}{dx} = \frac{f(x+dx) - f(x)}{dx} \quad (6)$$

Vaihtoehtojen yhdistetty standardiepävarmuus saadaan laskettua yhtälöllä (7) seuraavasti (Hiltunen ym. 2012):

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial E} * \Delta E\right)^2 * \left(\frac{\partial f}{\partial p} * \Delta p\right)^2 * \left(\frac{\partial f}{\partial K} * \Delta K\right)^2} \quad (7)$$

u_c = vaihtoehtojen yhdistetty standardiepävarmuus

f = sisäisen korkokannan funktio

E = energiamäärä

p = energianhinta

K = investointikustannus

Δ = kyseisen parametrin standardiepävarmuus

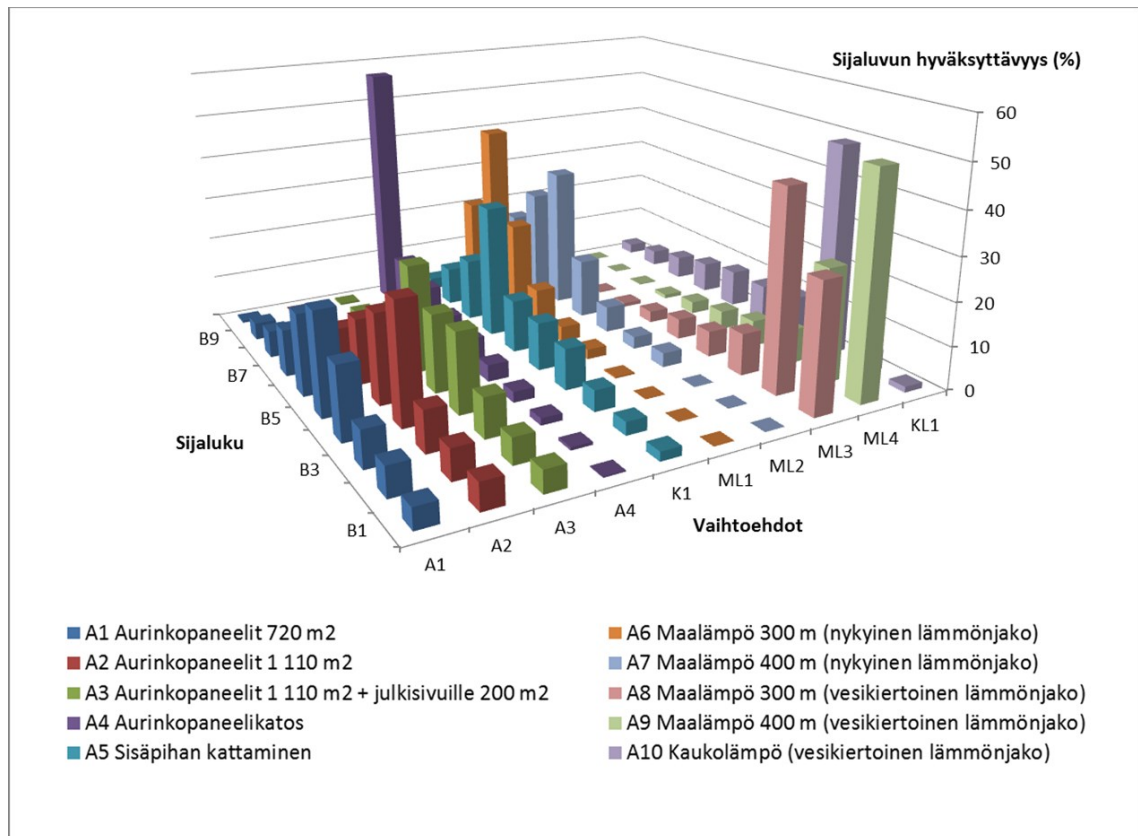
Taulukossa 7 on esitetty kaikkien vaihtoehtojen lopulliset standardiepävarmuudet.

Taulukko 7. Vaihtoehtojen standardiepävarmuudet.

| Vaihtoehto | | IRR | E-luku | CO2 | Houkuttelevuus |
|------------|---|-------|--------|------|----------------|
| A1 | Aurinkopaneelit 720 m ² | 0,006 | 0,05 | 0,31 | 1,14 |
| A2 | Aurinkopaneelit 1 110 m ² | 0,006 | 0,07 | 0,49 | 1,14 |
| A3 | Aurinkopaneelit 1 110 m ² + julkisivuille 200 m ² | 0,005 | 0,08 | 0,54 | 1,33 |
| A4 | Aurinkopaneelikatot | 0,004 | 0,00 | 0,03 | 1,43 |
| A5 | Sisäpihan kattaminen | 0,007 | 0,16 | 2,11 | 1,49 |
| A6 | Maalämpö 300 m (nykyinen lämmönjako) | 0,006 | 0,06 | 1,33 | 1,03 |
| A7 | Maalämpö 400 m (nykyinen lämmönjako) | 0,006 | 0,09 | 1,80 | 1,03 |
| A8 | Maalämpö 300 m (vesikiertoinen lämmönjako) | 0,005 | 0,66 | 8,49 | 1,03 |
| A9 | Maalämpö 400 m (vesikiertoinen lämmönjako) | 0,005 | 0,68 | 8,96 | 1,03 |
| A10 | Kaukolämpö (vesikiertoinen lämmönjako) | 0,006 | 0,00 | 0,00 | 1,26 |

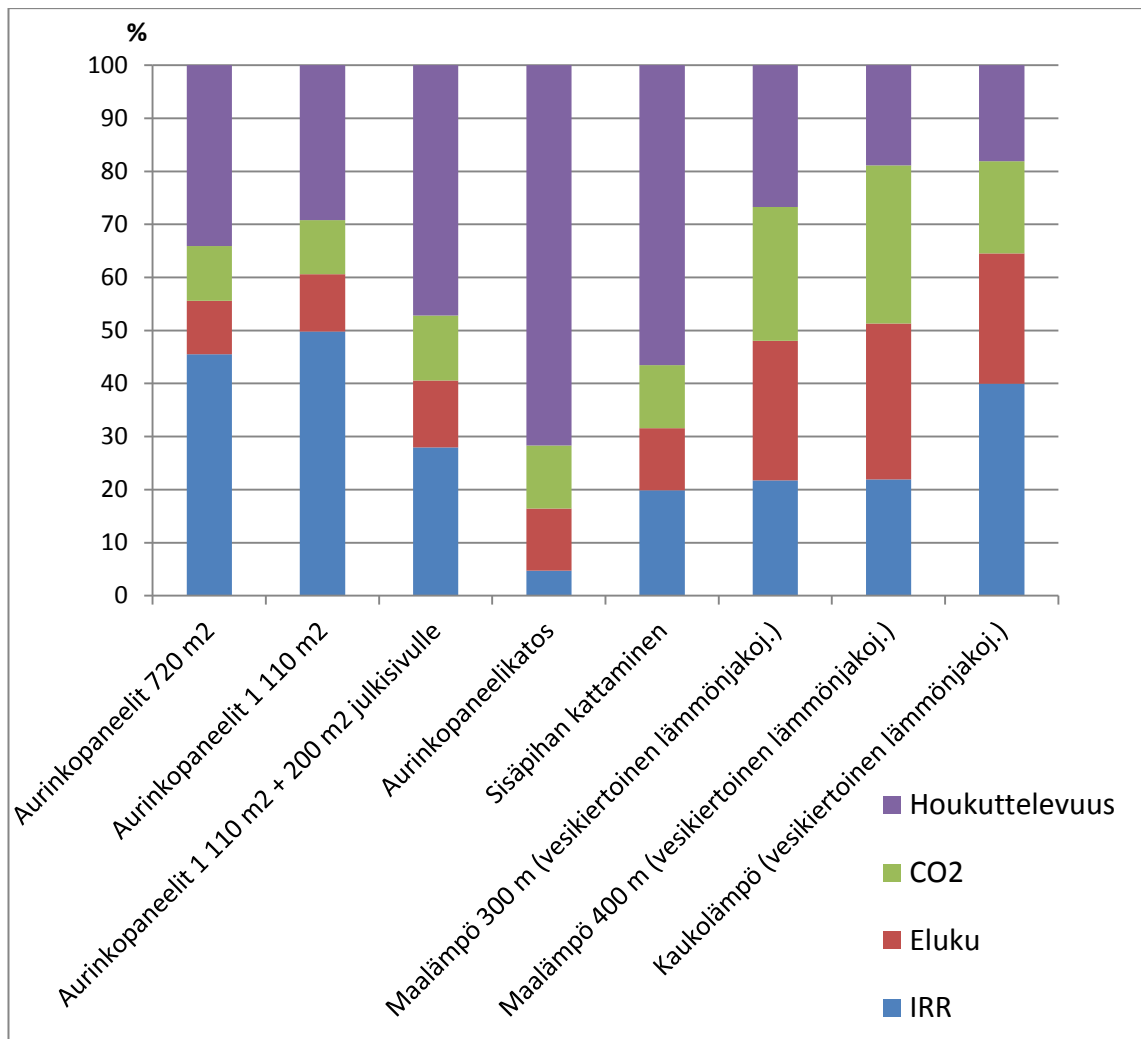
8.7 Laskennan tulokset

Kuvassa 42 on esitetty SMAA-mallin tuloksista vaihtoehtojen sijalukujen hyväksyttävyyssindeksit ilman päätöksentekijän preferenssejä. Tällöin kriteerit saavat simuloinnissa tasaisesti kaikki mahdolliset painotukset, jolloin saadaan informaatiota painoarvojen vaikutuksista tuloksiin. Tässä mallissa on oletettu, että myös laajamittaisten saneerausten toteuttaminen on mahdollista. Ensimmäisen sijaluvun (B1) kohdalla suurimman hyväksyttävyyden saa vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimiva maalämpöjärjestelmä 300 m syvyisillä kaivoilla ja seuraavaksi suurimman hyväksyttävyyden saa vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimiva maalämpöjärjestelmä 400 m syvyisillä kaivoilla. Seuraavina ovat, joskin huomattavasti pienemmällä hyväksyttävyyden arvoilla, katolle asennettavat aurinkopaneelivaihtoehdot. Kaukolämpö vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä saa kolmannen sijaluvun (B3) kohdalla selvästi suurimman hyväksyttävyyden arvon. Viimeisen sijaluvun (B10) kohdalla todennäköisin arvo on aurinkopaneelikatot.



Kuva 42. SMAA-mallin tulokset - Sijalukujen hyväksyttävyyssindeksit ilman päätöksentekijän preferenssejä.

Kuvassa 43 on esitetty SMAA-mallin tuloksista vaihtoehtojen keskeiset painotusvektorit ilman päätöksentekijän preferenssejä. Kuvan perusteella nähdään, millä kriteerien painotuksella tietty vaihtoehto on suotuisin. Informaatio auttaa ymmärtämään, miten kriteerien erilaiset painotukset vaikuttavat eri tarkasteluvaihtoehtoihin. Esimerkiksi sisäpihan kattaminen on järkevintä silloin, kun kriteerejä painotetaan seuraavasti: houkuttelevuus 56 %, CO₂-vaikutus 12 %, E-lukuvaikutus 12 % ja sisäinen korkokanta 20 %. Nykyisellä lämmönjakojärjestelmällä toimivat kaukolämpöä korvaavat maalämpövaihtoehdot eivät saaneet keskeisiä painotusvektoreja ollenkaan, joten ne eivät millään kriteerien painotuksilla saa ensimmäisen sijaluvun suurinta hyväksyttävyyttä. Kuvasta nähdään, että vahvalla sisäisen korkokannan (IRR) painotuksella sijoittuvat aurinkopaneelikatos sekä kaukolämpö vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä parhaiten. Painottamalla vahvasti vaihtoehtojen houkuttelevuutta, sijoittuvat katto- ja julkisivupaneelien yhdistelmä sekä sisäpihan kattaminen parhaiten. Houkuttelevuuden painottaminen on epäsuotuisinta kaukolämmön kannalta. Vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimivat maalämpövaihtoehdot sijoittuvat parhaiten painottamalla E-luku- sekä CO₂-päästövähennysvaikutusta.



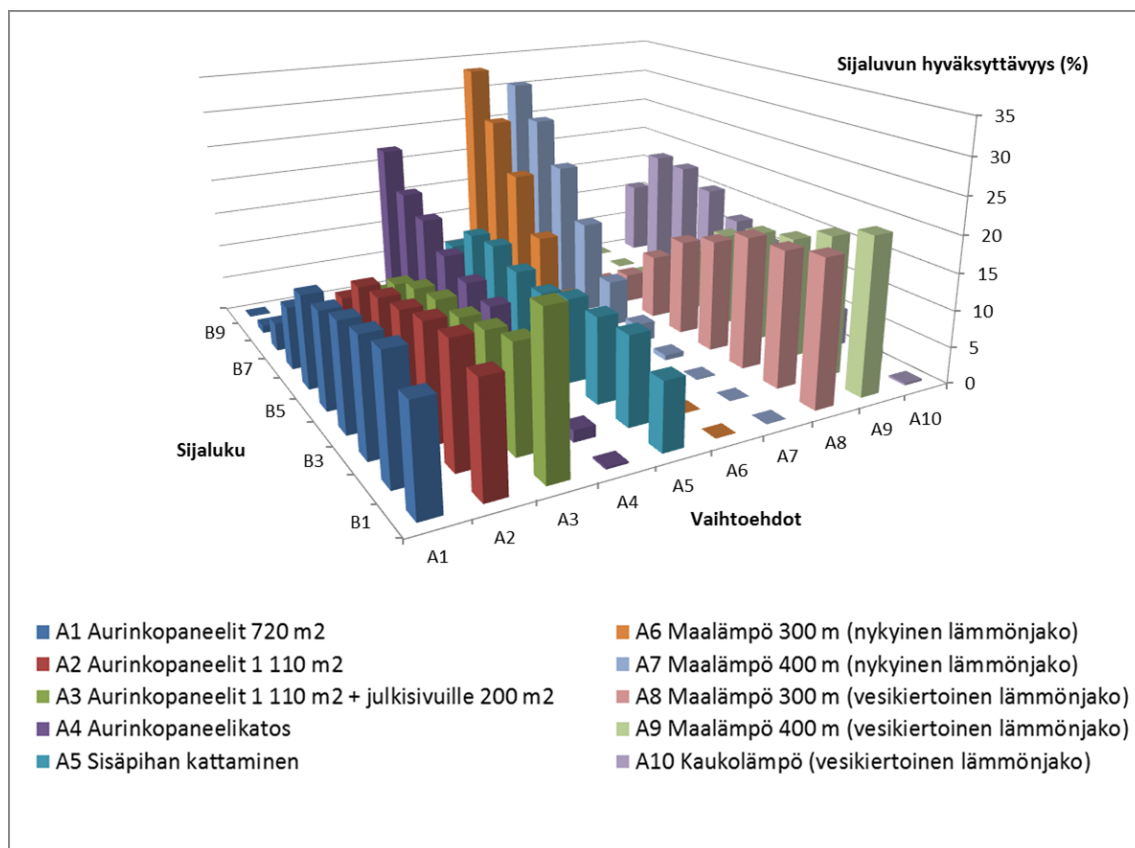
Kuva 43. Tarkasteluvaihtoehtojen keskeiset painotusvektorit ilman päätöksentekijän preferenssejä.

SMAA-malli antaa tuloksiksi myös tarkasteluvaihtoehtojen uskottavuusindeksit, jotka kuvaavat kuinka suurella todennäköisyydellä tietyt kriteerien painoarvot tekevät tarkastellusta vaihtoehdosta hyväksyttävimmän. Vaihtoehtojen uskottavuusindeksit on esitetty taulukossa 8 tapauksessa, jossa saneeraus on mahdollista, mutta päätöksentekijän preferenssejä ei ole huomioitu. Taulukosta nähdään, että uskottavuusindeksit ovat yli 40 % ainoastaan vesikiertoisilla lämmitysjärjestelmillä. Nykyistä lämmönjakojärjestelmää hyödyntävät maalämpövaihtoehdot saavat uskottavuusindeksin arvoksi 0 %. Suurimman uskottavuusindeksin 57,7 % omaa vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimiva maalämpö 400 m syvyisillä kaivoilla. Uskottavuusindeksit ovat siis keskimäärin varsin pieniä, mutta niitä olisi voitu kasvattaa tarkempien kriteerien mittausten avulla. Tämän työn puitteissa mittauksia ei kuitenkaan ollut mahdollista saada tämän tarkemmaksi.

Taulukko 8. Uskottavuusindeksit (%) ilman preferenssejä, saneeraus mahdollista.

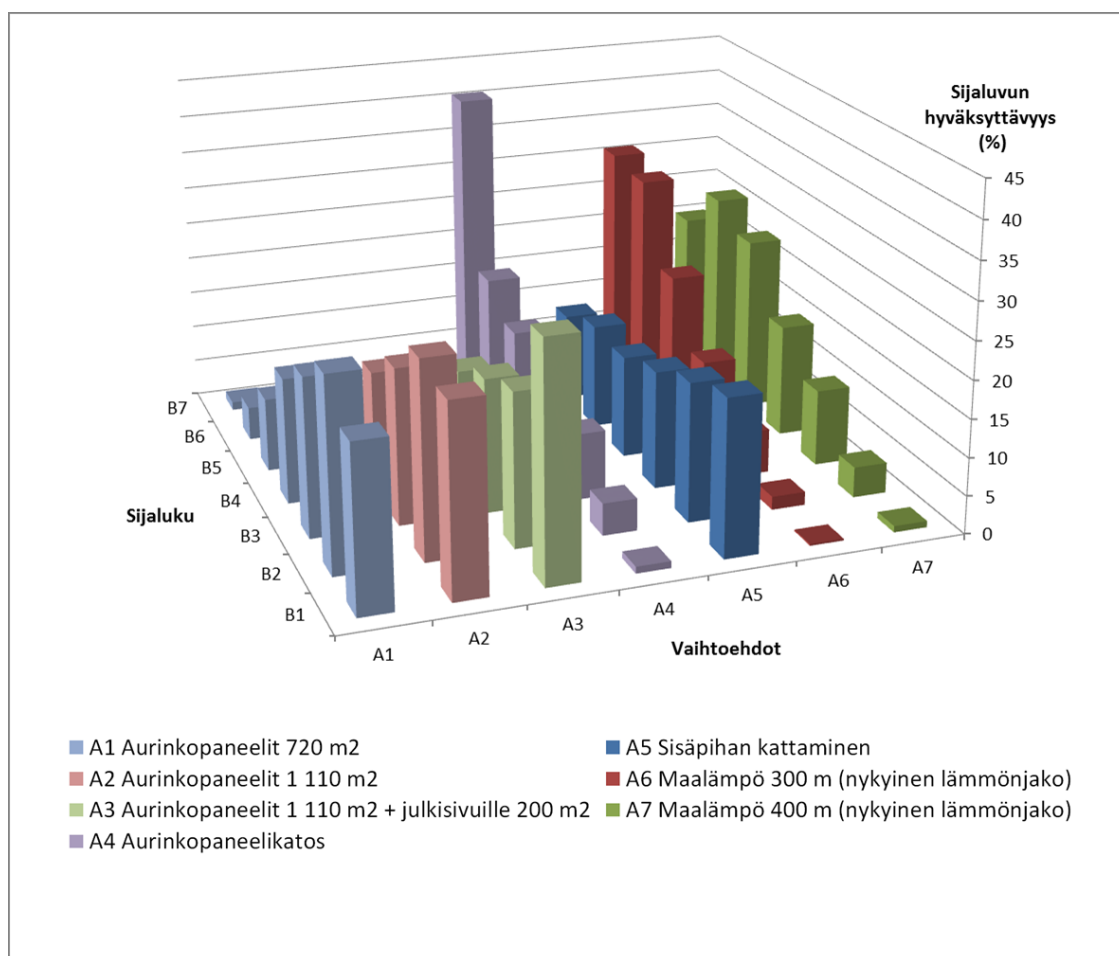
| Vaihtoehto | | Uskottavuusindeksi, % |
|------------|---|-----------------------|
| A1 | Aurinkopaneelit 720 m ² | 16,8 |
| A2 | Aurinkopaneelit 1 110 m ² | 21,3 |
| A3 | Aurinkopaneelit 1 110 m ² + julkisivuille 200 m ² | 16,9 |
| A4 | Aurinkopaneelikatot | 3,0 |
| A5 | Sisäpihan kattaminen | 10,5 |
| A6 | Maalämpö 300 m (nykyinen lämmönjako) | 0,0 |
| A7 | Maalämpö 400 m (nykyinen lämmönjako) | 0,0 |
| A8 | Maalämpö 300 m (vesikiertoinen lämmönjako) | 43,8 |
| A9 | Maalämpö 400 m (vesikiertoinen lämmönjako) | 57,7 |
| A10 | Kaukolämpö (vesikiertoinen lämmönjako) | 2,5 |

Koska päätöksentekijän preferenssit tarkastelukriteerien suhteen ovat tiedossa, voidaan SMAA-malli suorittaa niiden avulla, jolloin saadaan päätöksentekijän näkökulmasta realistisempia tuloksia. Kuvassa 44 on esitetty SMAA-mallin tuloksista vaihtoehtojen sijalukujen hyväksyttävyyssindeksit päätöksentekijän preferensseillä. Ensimmäisen sijaluvun osalta (B1) suurimman hyväksyttävyyden saa vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimiva maalämpöjärjestelmä 400 m syvyisillä kaivoilla. Seuraavaksi suurimmat hyväksyttävyydet ensimmäisen sijaluvun kohdalla saavat vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimiva maalämpöjärjestelmä 300 m syvyisillä vaihtoehdoilla sekä katolle ja julkisivuille asennettava aurinkopaneelijärjestelmä. Viimeisille sijaluvuille (B9-B10) sijoittuvat suurimmalla todennäköisyydellä maalämpövaihtoehdot nykyisellä lämmönjakojärjestelmällä.



Kuva 44. SMAA-mallin tulokset - Sijalukujen hyväksyttävyyssindeksit päätöksentekijän preferensseillä, saneeraus mahdollista.

Kuvassa 45 on esitetty SMAA-mallin tuloksista sijalukujen hyväksyttävyyssindeksit päätöksentekijän preferensseillä ilman laajamittaista saneerausta vaativia vaihtoehtoja. Tällöin on oletettu, että laajamittaiset saneeraukset eivät ole kohteessa mahdollisia. Sijan yksi (B1) suurimman hyväksyttävyyden saa sekä katolle että julkisivulle asennettava aurinkopaneelijärjestelmä. Seuraavaksi suurimmat hyväksyttävyydet ensimmäisen sijaluvun kohdalla saavat pelkästään katoille asennettavat aurinkopaneelit. Neljänneksi suurimman hyväksyttävyyden ensimmäisen sijaluvun osalta saa sisäpihan kattaminen. Viimeisille sijaluvuille (B5-B7) sijoittuvat suurimmalla todennäköisyydellä nykyisellä lämmönjakojärjestelmällä toimivat maalämpöjärjestelmät sekä aurinkopaneelikatos. Koska ensimmäisen sijan hyväksyttävyyssindeksit ovat kärkevillä vaihtoehdoillekin melko matalia, ei voida sanoa että mikään vaihtoehto varmuudella on paras. Sen sijaan analyysin perusteella voidaan sulkea pois vaihtoehdot, jotka saavat nollan tai lähes nollan suuruisen hyväksyttävyyssindeksin parhaalle sijalle.



Kuva 45. SMAA-mallin tulokset - Sijalukujen hyväksyttävyyssindeksit päätöksentekijän preferensseillä ilman saneerausvaihtoehtoja

Hyväksyttävyyssindeksien lisäksi SMAA-malli antaa tulokseksi parittaiset voittoindeksit. Ne kuvaavat yhden vaihtoehdon hyväksyttävyyttä toiseen vaihtoehtoon verrattuna ja ovat hyödyllisiä, kun halutaan vertailla juuri tiettyä vaihtoehtoa toiseen vaihtoehtoon nähden. Taulukossa 8 on esitetty parivertailut kaikkien vaihtoehtojen osalta tapauksessa, jossa on mukana asiakkaan edustajan painoarvot kriteereille skenaariossa, jossa nykyisen lämmönjakojärjestelmän saneeraus on mahdollista. Vasemman puoleisesta sarakkeesta katsotaan vaihtoehto, jota vertaillaan samalta riviltä muiden yläsarakkeessa nä-

kyvien vaihtoehtojen kanssa. Vaakariviltä voidaan lukea, millä todennäköisyydellä vaihtoehto on hyväksyttävämpi johonkin toiseen vaihtoehtoon verrattuna. Esimerkiksi ensimmäiseltä riviltä voidaan lukea, että katolle asennettava 720 m² aurinkopaneelijärjestelmä voittaa parivertailussa vesikiertoisen kaukolämpöjärjestelmän noin 83 %:n todennäköisyydellä. Lisäksi taulukosta nähdään, että esimerkiksi sisäpihan kattaminen on selvästi hyväksyttävämpi vaihtoehto verrattuna nykyisellä lämmönjaolla toimivaan maalämpöön, vesikiertoiseen kaukolämpöön tai aurinkopaneelikatokseen. Toisaalta kaikki muut aurinkoenergiaratkaisut aurinkopaneelikatosta lukuun ottamatta voittavat sisäpihan kattamisen parivertailussa yli 60 %:n todennäköisyydellä. Lisäksi vesikiertoiset maalämpöjärjestelmät ovat noin 70 % todennäköisyydellä sisäpihan kattamista hyväksyttävämpiä vaihtoehtoja.

Taulukko 9. Parittaiset voittoindeksit (%) päätöksentekijän preferensseillä, saneeraus mahdollista.

| Parivertailun voittoindeksit, % | | | | | | | | | | |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Vaihtoehto | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
| A1 Aurinkopaneelit 720 m ² | 0 | 50 | 49 | 85 | 62 | 97 | 96 | 41 | 41 | 83 |
| A2 Aurinkopaneelit 1 110 m ² | 50 | 0 | 49 | 85 | 63 | 97 | 96 | 43 | 41 | 83 |
| A3 Aurinkopaneelit 1 110 m ² + julkisivuille 200 m ² | 51 | 51 | 0 | 84 | 63 | 95 | 94 | 44 | 43 | 82 |
| A4 Aurinkopaneelikatokse | 15 | 15 | 16 | 0 | 26 | 64 | 62 | 10 | 9 | 43 |
| A5 Sisäpihan kattaminen | 38 | 37 | 37 | 74 | 0 | 87 | 85 | 31 | 30 | 70 |
| A6 Maalämpö 300 m (nykyinen lämmönjako) | 3 | 3 | 5 | 36 | 13 | 0 | 48 | 1 | 1 | 27 |
| A7 Maalämpö 400 m (nykyinen lämmönjako) | 4 | 4 | 6 | 38 | 15 | 52 | 0 | 1 | 1 | 30 |
| A8 Maalämpö 300 m (vesikiertoinen lämmönjako) | 59 | 57 | 56 | 90 | 69 | 99 | 99 | 0 | 49 | 89 |
| A9 Maalämpö 400 m (vesikiertoinen lämmönjako) | 59 | 59 | 57 | 91 | 70 | 99 | 99 | 51 | 0 | 89 |
| A10 Kaukolämpö (vesikiertoinen lämmönjako) | 17 | 17 | 18 | 57 | 30 | 73 | 70 | 12 | 11 | 0 |

9 Johtopäätökset

Tutkittavan kohteen laskennallinen sähkönkulutus osoittautui työssä todellista mittaroitua sähkönkulutusta selvästi pienemmäksi, minkä syyt on tulevaisuudessa tärkeä selvittää. Tarkemman mittaroinnin avulla voidaan parantaa kiinteistön energiatehokkuutta, kun saadaan jäljitettyä energiankulutuksen juurisyyt. Tulevaisuuden tarkasteluiden kannalta on myös suotavaa, että kohteen sähkönkulutus mittaroidaan käyttökohteittain, jolloin saadaan tarkempia lähtötietoja energiaratkaisujen määrittämiseen. Myös lähtötiedot työn energialaskelmia varten olisivat olleet luotettavammat, mikäli kiinteistössä olisi tarkempi sähkön mittarointi. Tarkemmalla mittaroinnilla saataisiin esimerkiksi selvitettyä, paljon sähkölämmitykseen kuluu todellisuudessa energiaa vuosittain. Samalla saataisiin tarkempaa informaatiota siitä, kuinka paljon tarvitaan uusiutuvaa sähköntuotantoa, jotta sähkölämmityksen energiantarve voidaan kattaa sillä kokonaan. Lisäksi mittarointi vähentäisi epävarmuutta monikriteerimallissa sisäisen korkokannan, E-lukuvaikutuksen sekä CO₂-päästövähennyskriteerien osalta.

Työssä valittiin energiaratkaisujen osalta tarkempaan tarkasteluun vesikiertoinen kaukolämpöjärjestelmä, sisäpihan kattaminen lasikatteella, erilaiset aurinkopaneelisovellukset sekä maalämpöjärjestelmät. Sisäpihan kattamisen investointia ei pystytty perustelemaan pelkän energiansäästön takaisinmaksuajan perusteella. Sisäpihan kattaminen on kuitenkin varteenotettava vaihtoehto, jos energiansäästön lisäksi mahdolliset positiiviset vaikutukset sisäpihan käyttöön, vuokralaistyytyväisyyteen sekä mahdollisuus sähköpatteiden osittaiseen poistamiseen huomioidaan. Sisäpihan kattamisen osalta simuloinnissa tehtiin IDA-ICE ohjelmalla yksinkertaistettu malli, jonka lähtötietoja muuttamalla laskettiin 10 eri laskentatapausta. Parhaaksi valitun laskentatapauksen perusteella voidaan säästää energiaa noin 90 MWh vuodessa. Ennen mahdollista sisäpihan kattamisen toteutusta, asiaa tulee kuitenkin vielä tutkia tarkemmin ja suorittaa yksityiskohtaisempi energiasimulointi. Tarkemman simuloinnin avulla voidaan selvittää katteen vaikutus lämpövihiytyvyyteen nykyistä laskentaa yksityiskohtaisemmin. Tämä on tärkeää, sillä sisäpihan tuomaa lisäarvoa ei haluta alentaa heikommalla lämpövihiytyvyydellä.

Maalämmön hyödyntäminen nykyisellä lämmönjakojärjestelmällä ei ole elinkaarikustannusten näkökulmasta kustannustehokasta. Nykyisen lämmitysmuodon osittainen korvaaminen maalämmöllä aiheuttaa huomattavat investointikustannukset, eivätkä maalämmön vuotuiset energiakustannukset ole merkittävästi kaukolämmön energiakustannuksia pienemmät. Tästä johtuen maalämpöjärjestelmä ei maksaisi itseään takaisin alle 20 vuodessa verrattuna olemassa olevaan kaukolämpöjärjestelmään. Tilanteessa, jossa on mahdollista uusia koko lämmönjakojärjestelmä vesikiertoiseksi, voidaan 400 m syvyisillä maalämpökaivoilla korvata sähkölämmitys kokonaan. Sen sijaan 300 m maalämpökaivoilla voidaan korvata sähkölämmitys vain osittain, jolloin loput osuudesta tuotetaan kaukolämmöllä. Mikäli suuri investointi lämmönjakojärjestelmän päivittämiseen päätetään tehdä, olisi maalämmöllä suositeltavaa tuottaa mahdollisimman suuri osa kohteen lämmitysenergiantarpeesta. Tällöin syvemmät 400 m maalämpökaivot ovat työn perusteella suositeltavampia. Suurista investointikustannuksista huolimatta, elinkaarikustannusten näkökulmasta maalämpövaihtoehdot uusitulla lämmönjakojärjestelmällä ovat kustannustehokkaampia verrattuna maalämpöjärjestelmiin nykyisellä lämmönjakojärjestelmällä. Toisaalta maalämpöinvestoinnin epävarmuutta lisää kaukolämmön hinnoittelumallien kehittyminen, minkä vuoksi kaukolämpö maalämmön lisälämmitysjärjestelmänä voi osoittautua tulevaisuudessa hyvin kalliiksi ratkaisuksi. Vaihtoehtoisesti rakennus voitaisiin lämmittää kokonaan kaukolämmöllä lämmönjakojärjestelmän uusimisen jälkeen. Tällöin selvittää pienemmillä investointikustannuksilla, mutta

päästään silti eroon sähkölämmityksestä. Myös saneeraustapauksessa kaukolämpö on elinkaarikustannuksiltaan maalämpöjärjestelmiä edullisempi ratkaisu.

Katolle asennettavat aurinkopaneelit ovat elinkaarikustannusten perusteella kaikista työssä tarkastelluista vaihtoehdoista kustannustehokkain ratkaisu. Tästä huolimatta niiden takaisinmaksuaika on noin 20 vuotta 5 % laskentakorolla. Koska aurinkopaneelit eivät itsessään ole kovin kustannustehokkaita elinkaarikustannuslaskelmien perusteella, on 720 m² aurinkopaneelijärjestelmällä parempi kustannustehokkuus elinkaarikustannusnäkökulmasta 1110 m² järjestelmään verrattuna. Molemmat vaihtoehdot ovat kokoluokaltaan niin suuria, että suuremmalla järjestelmällä ei saavuteta merkittävästi matalampia yksikkökustannuksia järjestelmään investoitaessa. Lisäksi suurempi järjestelmä edellyttää aurinkopaneelien hajanaisempaa sijoitusta, mikä nostaa hieman asennuskustannuksia paneelialaa kohti pienempään järjestelmään verrattuna. Julkisivupaneelit kattopaneelien lisänä heikentävät kustannustehokkuutta, sillä niiden energian tuotantomäärä suhteessa investointikustannuksiin on selkeästi heikompi pelkkiin katolle asennettaviin paneeleihin verrattuna. Aurinkopaneelikatoksen osalta kustannustehokkuus pelkän energiansäästön näkökulmasta on heikko, sillä katoksen päälle asennettavien aurinkopaneelien lisäksi merkittävä kustannus aiheutuu varsinaisen autokatoksen rakentamisesta.

Monikriteerimallin lähtötietojen osalta houkuttelevuus-kriteeri oli ainoa pehmeä arvo, joka määritettiin asiantuntijapaneelilla. Kyselyn perusteella katolle sekä julkisivulle asennettavat aurinkopaneelit sekä maalämpöjärjestelmä saivat parhaimmat arvot houkuttelevuudelle. Houkuttelevuusarvojen määrittämisestä olisi voitu tehdä nykyistä huomattavasti laajempi asiantuntijakysely, jolloin suuremmalla otosjoukolla olisi saatu luotettavampia tuloksia. Nyt kysely lähetettiin 22 henkilölle ja vastauksia saatiin 10 kappaletta. Tämän työn puitteissa kyseinen määrä todettiin riittäväksi. Tarkempaa tietoa eri kriteerien preferensseistä olisi voitu saada kohdistamalla kysely myös muille kohteen päätöksentekoon vaikuttaville henkilöille. Tässä työssä kriteerien preferenssit muodostettiin kuitenkin ensisijaisen päätöksentekijän painotusten mukaisesti.

Houkuttelevuuskyselyssä pienin keskihajonta oli maalämpöjärjestelmällä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että maalämpöjärjestelmä on itsessään varsin yksiselitteinen ja se osataan yleensä arvottaa kauko- ja sähkölämmitykseen verrattuna. Suurin keskihajonta oli sähköautoille tarkoitettulla aurinkopaneelikatoksella. Tätä vaihtoehtoa ajatellaan todennäköisesti monesta eri näkökulmasta, koska se sisältää sekä aurinkopaneeleita että sähköautojen latauspisteitä, joten tämä itsessään voi jo aiheuttaa suurempaa keskihajontaa. Lisäksi koska kyselyssä ei määritetty katoksen sijaintia, saattavat ihmiset visualisoida sen eri tavoin näkyväksi vaihtoehdoksi. Tärkeimpänä syynä kyseisen vaihtoehdon keskihajonnalle on todennäköisesti se, että Suomessa aurinkopaneeliautokatos on varsin uusi ratkaisu, joten ihmiset arvottavat sitä eri tavoin. Houkuttelevuuskyselyssä ei myöskään lähdetty tarkemmin kuvaamaan eri vaihtoehtoja johtuen sekä kilpailullisista syistä ja siitä, että kysely haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena vastausten määrän maksimointia varten. Jos vaihtoehdot olisivat esitetty tarkemmin ja niiden sijainti olisi havainnollistettu tarkemmin, olisi aurinkopaneelikatosis mahdollisesti saanut paremman arvon houkuttelevuudelle, koska se on ratkaisuihin näkyvimmällä paikalla. Koska houkuttelevuus-kriteerin painoarvo on mallissa 50 %, vaikuttavat sen heilahtelut monikriteerimallin tuloksiin merkittävästi. Aurinkopaneelikatosis todennäköisesti sijoittunut optimointimallissa paremmin, jos houkuttelevuus-kyselyssä olisi korostettu sen näkyvyyttä verrattuna muihin ratkaisuihin. Monikriteerimallissa aurinkopaneelikatosis ei sijoittu kärkeisijoihin, mikä johtuu lähinnä sen keskinkertaisesta houkuttelevuusarvosta, nega-

tiivisesta sisäisen korkokannan arvosta sekä pienestä energiantuotannon määrästä. Toisaalta aurinkopaneelikatoksen sijoitusta mallissa voidaan pitää perusteltuna, kun huomioidaan sen hyvin vähäinen uusiutuvan energian tuotantomäärä. Vaikka aurinkopaneelikatosisikin vaihtoehtoista näkyvimmällä paikalla, voi osa ihmisistä pitää sitä osittain viherpesuna, koska sen tuotannon osuus suhteessa kiinteistön sähköenergiankulutukseen on hyvin pieni. Tämän vuoksi onkin perusteltua yhdistää aurinkopaneelikatosis esimerkiksi katolle asennettavan aurinkosähköjärjestelmän kanssa, jolloin aurinkopaneelikatosis olisi vain osa kiinteistön suurempaa aurinkosähköjärjestelmää. Tällöin se menestyisi myös mallissa huomattavasti paremmin.

E-lukuvähennys sekä CO₂-vähennys ovat molemmat riippuvaisia siitä, kuinka paljon energiaratkaisulla pystytään säästämään energiaa. Osittain päällekkäiset kriteerit siis ilmenevät saaduissa tuloksissa siten, että painottamalla vaihtoehtoja, joilla on paras CO₂-päästövähennysvaikutus, saavutetaan myös paras E-lukuvaikutus. Kaikki saneerausvaihtoehdot ovat sekä E-luvun että CO₂-päästövähennysten näkökulmasta parhaat vaihtoehdot, koska tällöin päästään kokonaan eroon sähkölämmityksestä. Sisäisen korkokannan näkökulmasta katoille asennettavat aurinkopaneelit ovat kustannustehokkuudeltaan parhaita, vaikka niidenkään sisäinen korkokanta ei varsinaisesti ole korkea. Tarkasteltaessa vaihtoehtojen rahallista tuottoa, pelkkä energiansäästö huomioiden, ei mikään vaihtoehto ole kovin kustannustehokas.

Vuokrasopimusten tai vuokralaisen toiminnan takia, laajamittainen saneeraus ei välttämättä ole mahdollista kohteessa. Tämän vuoksi monikriteerimalli suoritettiin myös ilman saneerausmahdollisuutta, jolloin tarkasteluvaihtoehtoista rajattiin pois vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimivat maalämpöjärjestelmät sekä kaukolämpöjärjestelmä. Tämä malli kuvaa paremmin nykytilanteessa toteutettavia toimenpiteitä. Rajatun monikriteerimallin tuloksena aurinkopaneelijärjestelmät, lukuun ottamatta aurinkopaneelikatosis, ovat hyväksyttävimpiä vaihtoehtoja. Tämä on perusteltua, koska nämä ratkaisut ovat parhaita sisäisen korkokannan näkökulmasta sekä karkisijoilla myös houkuttelevuus-kriteerin osalta. Vaikka maalämpö sai varsin korkean arvon houkuttelevuudelle, ei sen hyödyntäminen kaukolämpöä korvaamalla ole kustannustehokasta. Maalämpö edellyttää suuria investointikustannuksia verrattuna olemassa olevan kaukolämpöjärjestelmän hyödyntämiseen. Lisäksi kaukolämmön energiamaksulla ja maalämmön tarvitseman sähköenergian kustannuksilla ei ole niin merkittävää eroa, että kaukolämpöä korvaava maalämpöjärjestelmä maksaisi itseään tässä tilanteessa takaisin kohtuullisessa ajassa.

Työssä käytetty SMAA-menetelmä sopi varsin hyvin aputyökaluksi soveltuvimman energiaratkaisun löytämisessä. Työkalu auttoi skaalaamaan eri kriteerit vertailukelpoisiksi ja huomioimaan niiden eri painoarvot. Lisäksi SMAA-mallin hyödyntäminen oli hyödyllistä, koska perinteisellä monikriteerianalyysillä kriteerien painoarvojen määrittämisestä johtuva epävarmuus olisi voinut aiheuttaa suuria heilahteluja mallin tuloksiin. SMAA-mallin avulla saatiin tärkeää lisäinformaatiota siitä, miten kriteerien erilainen painotus vaikuttaa eri vaihtoehtojen hyväksyttävyyteen. SMAA-mallissa haasteellista oli kuitenkin kriteerien valinta siten, että saatavat tulokset ovat mahdollisimman luotettavia ja realistisia. Esimerkiksi investointikustannuksia ei huomioida erikseen. Investointikustannus on myös päätöksentekijälle tärkeä kriteeri, mutta pelkkä investointikustannus itsenäisenä kriteerinä jätettiin pois monikriteerimallista. Tämä johtuu siitä, että se korreloi sisäisen korkokannan (IRR) kriteerin kanssa, jolloin nämä kriteerit olisivat ylikorostuneet mallissa.

SMAA-mallin tulosten perusteella tarkasteluvaihtoehtojen hyväksyttävyyden jakautuu monelle eri sijaluvulle. Tämä tarkoittaa sitä, että lähtötietoparametreja muuttaessa nykyisten epävarmuuksien rajoissa, voivat tarkasteluvaihtoehdot sijoittua useille eri sijoituksille. Tätä epävarmuutta kuvastaa myös taulukossa 8 kuvattujen tarkasteluvaihtoehtojen uskottavuusindeksien pienet arvot. Tulosten perusteella korkeimpienkin hyväksyttävyyden omaavien vaihtoehtojen osalta uskottavuusindeksit ovat vain hieman yli 20 %. Tällöin kyseiset vaihtoehdot saavat suurimman hyväksyttävyyden sijaluvun näin pienillä todennäköisyyksillä. Toisaalta SMAA-malli antaa informaatiota suurimman hyväksyttävyyden ratkaisusta, vaikka niidenkään hyväksyttävyydet eivät olisi kovin suuria. Malli siis kertoo suhteellisesti parhaimman ratkaisun, vaikka epävarmuudet olisivatkin suuria. Merkittävin syy pienten uskottavuusindeksien taustalla on houkuttelevuus-kriteerin suuret suhteelliset epävarmuudet. Houkuttelevuus-kriteerin epävarmuutena käytettiin vaihtoehtojen keskihajontaa tarkasteluvaihtoehtojen osalta, ja johtuen suuresta keskihajonnasta, myös mallin epävarmuudet ovat suuria. SMAA-mallissa on suositeltavaa tarkentaa kriteerien lähtöarvojen mittauksia, mikäli tulosten perusteella saadaan liian pienet uskottavuusindeksit vaihtoehdoille. Eräänä vaihtoehtona olisi laajentaa asiantuntijapaneelia suuremman vastausmäärän toivossa, jolloin mahdollisesti vaihtoehtojen keskihajonnaksi saataisiin pienempiä arvoja. Toisaalta laajempikaan asiantuntijapaneeli ei välttämättä vaikuta vaihtoehtojen keskihajontoihin, sillä ihmisillä voi olla hyvin erilaisia mielipiteitä eri energiaratkaisuja koskien. Johtopäätöksenä voidaan siis todeta, että mikäli monikriteerimallin kriteeriksi halutaan jokin pehmeitä arvoja edustava kriteeri, jota ei voida mitata muulla tavoin kuin kyselytutkimuksen avulla, tulee vaihtoehtojen keskihajonta aina aiheuttamaan merkittävää epävarmuutta mallin lopullisiin tuloksiin. Toisaalta tällöin suurempi epävarmuus vastaa hyvin todellisuutta, koska vaikutus kiinteistön houkuttelevuuteen perustuen ihmisten mielipiteisiin ja näkökantoihin on aina haastavaa määrittää.

Työ tarjoaa tärkeää informaatiota päätöksentekijälle, vaikka työn tulokset sisältävätkin epävarmuutta. Työn varsinaisessa monikriteerimallissa ei tarkasteltu vaihtoehtona sähkönkulutuksen mittarointia, mutta työn kappaleen 4 perusteella sähkömittaroinnin lisäämistä suositellaan kiinteistön energiatehokkuuden parantamiseksi. SMAA-mallin tulosten perusteella katolle sekä julkisivulle asennettavia aurinkopaneeleita suositellaan tapauksessa, jossa nykyisen lämmönjakojärjestelmän saneeraus ei ole mahdollista. Elin-kaarikustannuslaskennan perusteella vaihtoehto, jossa asennetaan aurinkopaneeleita sekä katolle että julkisivulle, on elinkaarikustannuksiltaan kalliimpi ratkaisu verrattuna vaihtoehtoon, jossa aurinkopaneeleita asennetaan vain katolle. Tämä johtuu siitä, että julkisivulle asennettavat aurinkopaneelit ovat kalliimpia sekä tuottavat vähemmän aurinkosähköä kuin katolle asennettavat paneelit. Asiantuntijapaneelin perusteella julkisivulle asennettavat paneelit ovat kuitenkin houkuttelevuudeltaan hieman katolle asennettuja paneeleita parempia. Tämä selittää katto- ja julkisivupaneelilyhdistelmän korkeamman sijoituksen, koska houkuttelevuus-kriteerin painoarvo on 50 %. Vaikka julkisivupaneelit eivät näy pääjulkisivulle, voi niiden avulla silti saada lisänäkyvyyttä kattopaneeliin verrattuna. Aurinkopaneelikatoksen toteutusta voidaan harkita ratkaisuvaihtoehtona vain, mikäli se yhdistetään katolle asennettavan aurinkosähköjärjestelmän kanssa. Koska houkuttelevuusnäkökulma oli kriteereistä tärkein, aurinkopaneelikatoksen toteutus voi olla perusteltua lisänäkyvyyden takia. Tällöin näkyvällä paikalla sijaitseva aurinkopaneelikatos voi kasvattaa ihmisten tietoisuutta myös katolla sijaitsevasta laajemmasta aurinkopaneelijärjestelmästä. Lisäksi aurinkopaneelikatos on investointikustannuksiltaan edullisin tarkastelluista ratkaisuksista. Jos lämmönjakojärjestelmän uusiminen on tulevaisuudessa mahdollista, suositellaan vesikiertoista maalämpöjärjestelmää 400 m syvyisillä kaivoilla. Kyseinen ratkaisu on E-luku ja CO₂-kriteereiden

osalta selvästi paras vaihtoehto, ja ratkaisun avulla kiinteistö pääsisi parempaan E-lukuluokkaan. Sisäisen korkokannan näkökulmasta vaihtoehto on keskitasoa muihin verrattuna ja houkuttelevuuden näkökulmasta kärkisijoilla, mikä selittää ratkaisun korkean sijoituksen.

10 Jatkotutkimusehdotukset

Riippuen kohteen tulevasta käytöstä, ja siitä päädytäänkö lämmönjakojärjestelmä saneeraamaan ja harkitseeko kiinteistön omistaja maalämmön hyödyntämistä, tulee tontilla suorittaa TRT-mittaus. Mittauksen avulla saadaan tarkempaa informaatiota alueen kallioperästä, jolloin maalämpökenttä pystytään mitoittamaan mahdollisimman tarkasti ja päästään parhaaseen kustannustehokkuuteen. Mikäli sisäpihan kattaminen päädytään toteuttamaan, on tätä ennen hyvä suorittaa tarkemmat tarkastelut ratkaisun vaikutuksesta kohteen sisäilmastoon; toimeenpannun ratkaisun tulee säilyttää sisäilmaston laatu vähintään samalla tasolla mitä se nykyään on eikä se saa vaikuttaa negatiivisesti vuokraistyytyväisyyteen. SMAA-mallissa hyödynnettyä asiantuntijapaneelia koskien kiinteistön energiaratkaisujen eri houkuttelevuusarvoja voitaisiin tutkia laajemmassa mitta-kaavassa sisällyttämällä kyselytutkimukseen aiempaa useampia ratkaisuja sekä toteuttamalla kysely huomattavasti suuremmalla otannalla. Suuremmalla asiantuntijaotoksella houkuttelevuusdataa pystyttäisiin mahdollisesti hyödyntämään laajemminkin eri konsulttien jokapäiväisessä työssä yhtenä numeerisena kriteerinä kiinteistöjen potentiaalisten energiaratkaisujen valinnassa.

11 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli tutkia olemassa olevalle Colosseum -toimistorakennukselle sopivia energiaratkaisuita, joilla voitaisiin kohentaa rakennuksen houkuttelevuutta vuokramarkkinoilla. Työssä tarkasteltiin aluksi lähiaikojen energiatrendejä, kuten aurinkopaneelien kustannustason sekä sähkön hinnan kehitystä, mikä toimi perustana rakennukselle soveltuvien energiaratkaisujen valintaa varten. Tämän jälkeen perehdyttiin tutkittavaan kiinteistöön ja sen energiankulutukseen. Huomattiin, että tarkastelujen perusteella kiinteistön todellinen sähkönkulutus on laskennallista sähkönkulutusta suurempi. Tämän johdosta kiinteistöön suositellaan tarkemman sähkömittaroinnin lisäämistä, jonka avulla voidaan muun muassa selvittää mahdolliset ohjaus- tai laiteviat kiinteistössä. Työssä perehdyttiin myös kiinteistötalouden näkökulmaan ja tarkasteltiin, millä keinoin energiaratkaisuja voidaan hyödyntää kiinteistön imagon parantamisessa ja mahdollisesti kiinteistön käyttöasteen kasvattamisessa. Tämän jälkeen perehdyttiin kirjallisuuskatsauksen muodossa eri hajautettuihin energiantuotantojärjestelmiin ja tarkasteltiin niiden soveltuvuutta kohteessa. Tämän johdosta tarkempaan tarkasteluun valittiin erilaiset maalämpöjärjestelmät sekä aurinkopaneelisovellukset. Lisäksi tarkempaan tarkasteluun valittiin myös sisäpihan kattaminen lasikatteella sekä vesikiertoinen kaukolämpöjärjestelmä. Elinkaarikustannusten näkökulmasta aurinkopaneelien asentaminen katolle osoittautui parhaaksi vaihtoehdoksi. Mikään tarkastelu-vaihtoehto ei kuitenkaan ole erityisen kustannustehokas. Koska päätöksentekoon vaikuttaa muitakin tekijöitä pelkkien elinkaarikustannusten lisäksi, hyödynnettiin päätöksenteossa stokastista monikriteeriarvostusanalyysia, jossa tarkasteltiin ratkaisuja neljästä eri näkökulmasta. Näitä tarkastelukriteereitä olivat sisäinen korkokanta, vaihtoehdon houkuttelevuus, E-lukuvaikutus sekä CO₂-päästövähennys. Kriteereistä houkuttelevuusvaikutusta lukuun ottamatta kaikki määritettiin laskennallisesti ja houkuttelevuusvaikutuksen arvot määritettiin asiantuntijapaneelia hyödyntämällä. Kiinteistönomistajan edustajalta saatiin painotukset tarkastelukriteerien tärkeydelle. SMAA-mallin avulla saatiin lisäinformaatiota kriteerien painotusten vaikutusta koskien. Kriteerien painotukset huomioiden, mallin mukaan paras vaihtoehto oli katolle sekä julkisivulle asennettavat aurinkosähköjärjestelmä oletuksella, että kiinteistössä ei tehdä suurempia saneeraustoimenpiteitä. Mikäli huomioidaan mahdollisuus suurempaan saneeraukseen, osoittautui vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä toimiva maalämpöjärjestelmä 400 m syvyisillä kaivoilla parhaaksi ratkaisuksi.

Lähdeluettelo

- AUVINEN, K., LOVIO, R., JALAS, M., JUNTUNEN, J., LIUKSIALA, L., NISSILÄ, H. and MÜLLER, J., 2016a. FinSolar: Aurinkoenergian markkinat kasvuun Suomessa-Liiketoimintaympäristö| Investointien kannattavuus| Rahoitus-ja hankintamallit| Politiikkasuositukset. [Viitattu: 28.7.2016]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/20264>. ISSN 1799-4802 (sähköinen)
- AUVINEN, K., JALAS, M., 2016b. Aurinkosähköjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus. Finsolar. [Online]. [Viitattu: 28.7.2016]. Saatavissa: <http://www.finsolar.net/kannattavuus/aurinkoenergia-on-kannattavaa-suomessa-kiinteistoihin-sijoitettuna-energialahteenä/>
- AYRE, J., 2015. Electric Car Demand Growing, Global Market Hits 740,000 Units. [Homepage of Cleantechnica], [Online]. [Viitattu: 29.6.2016]. Saatavissa: <http://cleantechnica.com/2015/03/28/ev-demand-growing-global-market-hits-740000-units/>
- BUONOMANO, A., CALISE, F., D'ACCADIA, M.D., PALOMBO, A. and VICIDOMINI, M., 2015. Hybrid solid oxide fuel cells-gas turbine systems for combined heat and power: a review. Applied Energy, 156, pp. 32-85. Saatavissa: <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.apenergy.2015.06.027>
- CHRISTERSSON, M. and RAJAKALLIO, K., 2015. Laadukkaan sisäympäristön lisäarvo-SY-ohjelman WP3: n tutkimusraportti. [Online]. [Viitattu: 5.7.2016]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-6269-3>. ISSN (sähköinen) 1799-4888
- EARTH ENERGY DESIGNER (EED) versio 3.16, 2010.
- EERIKÄINEN, H. and SARASOJA, A., 2013. Marketing green buildings-well-structured process or forgotten minor detail? Evidence from Finland. Property Management, 31(3), pp. 233-245. [Online] DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/02637471311321478>
- EKLUND, E., 2011. Jokamiehen opas pientuulivoiman käyttöön. Kodin vihreä energia Oy. ISBN: 978-951-609-509-0. SITRA EKOTEHOKAS TAMPERE [Online]. [Viitattu: 2.4.2016]. Saatavissa: http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/759-Joka_miehen_opas_motiva.pdf
- ELINKEINOELÄMÄN KESKUSLIITTO, 2012. Energiaopas pienille ja keskisuurille yrityksille. Koonnut: Jutta Linna ja Jenni Nuutinen. [Online]. [Viitattu: 10.10.2016]. Saatavissa: <https://ek.fi/wp-content/uploads/energiaopas.pdf>
- ELO, 2014. Ki Oy Vantaan Rajatorpantie 8 teki sopimuksen kokonaisvaltaisesta energiansäästöhankkeesta. [Online]. [Viitattu: 10.5.2016]. Saatavissa: <http://toimitilat.elo.fi/toimitilauutiset/ki-oy-vantaan-rajatorpantie-8-teki-sopimuksen-kokonaisvaltaisesta-energiansaastohankkeesta/#/>
- ELO, 2016. Colosseum Business Center. [Online]. [Viitattu: 10.5.2016]. Saatavissa: http://toimitilat.elo.fi/kiinteistomme/#/kiinteistomme/colosseum_business_center

ENERGIATEOLLISUUS, 2016a. Lainsäädäntö ja viranomaisvalvonta. [Online]. 2016. [Viitattu: 28.4.2016]. Saatavissa: <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/lainsaadanto-ja-viranomaisvalvonta>

ENERGIATEOLLISUUS, 2016b. Kaukolämmön hinta. [Online]. [Viitattu: 10.5.2016]. Saatavissa: <http://energia.fi/koti-ja-lammitys/kaukolammitys/kaukolammon-hinta>

ENERGIATEOLLISUUS, 2016c. Diaesitys kaukolämmön hinnan kehityksestä. [Online]. [Viitattu 10.9.2016]. Saatavissa: http://energia.fi/files/774/Liite2_KL-hinta_010716.pptx

ENERGIIVIRASTO, 2016. Yleistä päästökaupasta. [Online]. [Viitattu: 19.11.2016]. Saatavissa: <http://www.energiavirasto.fi/yleista-paastokaupasta>

EUROOPAN KESKUSPANKKI, 2016. The definition of price stability. [Online]. [Viitattu: 20.8.2016]. Saatavissa: <https://www.ecb.europa.eu/mopo/strategy/pricestab/html/index.en.html>

EUROOPAN KOMISSIO, 2016a. Revision for phase 4 (2021-2030). [Online]. Viitattu: 19.11.2016. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/revision/index_en.htm

EUROOPAN KOMISSIO, 2016b. Carbon leakage. [Online]. [Viitattu: 19.11.2016]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/leakage/index_en.htm

EUROOPAN KOMISSIO, 2016c. Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. Joint Research Centre (JRC). [Online]. [Viitattu: 3.5.2016]. Saatavissa: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

EUROSTAT, 2016. Energy price statistics. ISSN 2443-8219 [Online]. Viitattu 19.11.2016. Saatavissa: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics

FINGRID, 2015. Fingridin kantaverkkomaksut nousevat - tavoitteena vakaa ennustettava tariffi. [Online]. Lehdistötiedotteet. 29.10.2015. [Viitattu: 19.4.2016]. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut%2FFingridin-kantaverkkomaksut-nousevat---tavoitteena-vakaa-ennustettava-tariffi.aspx>

FINLEX, 9/2013. Valtioneuvoston asetus rakennuksissa käytettävien energiamuotojen kertoimien lukuarvoista. [Online]. [Viitattu 19.11.2016]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130009>

FINNFACTS, 2016. Finland produces fuel from solar power. Good News From Finland. [Online]. [Viitattu: 12.8.2016]. Saatavissa: <http://www.goodnewsfinland.com/finland-produces-fuel-from-solar-power/>

FINSOLAR, 2016. Kannattavuuslaskurit. [Online]. [Viitattu: 6.7.2016]. Saatavissa: <http://www.finsolar.net/kannattavuus/kannattavuuslaskurit/>

FRAUNHOFER, I., 2014. Recent facts about photovoltaics in Germany. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Germany, Tech.Rep.

GAO, L., DOUGAL, R.A., LIU, S. and IOTOVA, A.P., 2009. Parallel-connected solar PV system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(5), pp. 1548-1556.

GASUM, 2016. Gasum osarahoittajaksi Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle rakennettavaan Suomen ensimmäiseen Power-to-X –pilottilaitokseen. [Online]. [Viitattu: 10.5.2016]. Saatavissa: http://www.gasum.fi/Tietoa_Gasumista/Uutiset/2016/gasum_power_to_x/

GEHLIN, S., 1998. Thermal response test. situ measurements of thermal properties in hard rock. Licentiate thesis. Luleå University of Technology, 37.

GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS, 2016. Paikkatietotuotteet. [Online]. [Viitattu: 13.5.2016]. Saatavissa: <http://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>

GREEN BUILDING COUNCIL FINLAND, 2011. Kiinteistönomistaja: energiatehokkuus kasvattaa kiinteistösi arvoa. [Online]. [Viitattu: 6.7.2016]. Saatavissa: <http://figbc.fi/kiinteistonomistaja-energiatehokkuus-kasvattaa-kiinteistosi-arvoa/>

GREEN BUILDING COUNCIL FINLAND, 2015. Ympäristöluokitukset. [Online]. [Viitattu: 15.7.2016]. Saatavissa: <http://figbc.fi/tietopankki/ymparistoluokitukset/>

GREEN, M.A., EMERY, K., HISHIKAWA, Y., WARTA, W. and DUNLOP, E.D., 2015. Solar cell efficiency tables (Version 45). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 23(1), pp. 1-9.

HALME, M., HUKKINEN, J., KORPPI-TOMMOLA, J., LINNANEN, L., LISKI, M., LOVIO, R., LUND, P., LUUKKANEN, J., NOKSO-KOIVISTO, O. and PARTANEN, J., 2014. Kasvua ja työllisyyttä uudella energiapolitiikalla.

HELJO, J., LAINE, H., 2005. Sähkölämmitys ja lämpöpumput sähkökäyttäjinä ja päästöjen aiheuttajina Suomessa. Näkökulma ja malli sähkökäytön aiheuttamien CO₂-ekv päästöjen arviointia varten. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

HELJO, J., NIPPALA, E., & NUUTTILA, H., 2005. Rakennusten energiankulutus ja CO₂-ekv päästöt Suomessa. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakentamistalouden laitos, Raportti.

HELSINGIN KAUPUNKI, 2012. Aurinkovoimala Helsingin Kaupungin Östersundomiin. Esiselvitys. 30.11.2012. [Viitattu: 13.5.2016]. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/ksv/ostersundom/aurinkovoimala_esiselvitys_301112.pdf

HELSINGIN KAUPUNKINGIN TIETOKESKUS, 2016. Toimitilamarkkinat Helsingissä ja pääkaupunkiseudulla syksyllä 2015. ISSN (sähköinen) 1455-7231

HERNBERG, H., 2014. Tyhjät tilat.

HILTUNEN, E., LINKO, L., HEMMINKI, S., HÄGG, M., JÄRVENPÄÄ, E., SAARINEN, P., SIMONEN, S. and KÄRHÄ, P., 2012. Laadukkaan mittaamisen perusteet.

HOLOPAINEN, R., HEKKANEN, M., HEMMILÄ, K. and NORVASUO, M., 2007. Suomalaisten rakennusten energiakorjausmenetelmät ja säästöpotentiaalit. VTT tiedotteita, 2377.

HSY, 2016. Aurinkopaneelille sopivat sijainnit. [Online]. [Viitattu: 11.7.2016]. <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/avoindata/Sivut/Avoindata.aspx?dataID=40>

IDA ICE ohjelma, versio 4.7., 2016. EQUA Simulation AB.

IHONEN, J., UUSALO, H., Laurikko, J., 2012. . Vety- ja polttokennoalan eteneminen meillä ja maailmalla, Suomen vetytiekartta. Esitysmateriaali: Vedyn ja polttokennojen mahdollisuudet Oulun seudulla, Aamiaissessio Oulussa. [Online]. [Viitattu: 19.11.2016]. Saatavissa: https://www.tekes.fi/globalassets/global/ohjelmat-ja-palve-lut/ohjelmat/polttokennot/aineistot/ihonen_vety_ja_polttokennoalan_eteneminen_meilla_ja_maailmalla_suomen_vetytiekartta_oulu2012.pdf

ILMATIETEENLAITOS, 2016. Energialaskennan testivuosien tuntiaineisto. [Online]. Viitattu: 15.6.2016. Saatavissa: http://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=10e5d4a5-72cc-4755-8cd3-1b60328dfce6&groupId=30106

JUMPPANEN P, 2009. Vety energiantuotannossa. Rakenteiden Mekaniikka Vol. 42, Nro 4, 2009, s.218–234. [Online]. [Viitattu: 20.5.2016]. Saatavissa: http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/RakMek_42_4_2009_4.pdf

JUVONEN, J., LAPINLAMPI, T. 2013. Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas 2013. Edita Prima Oy, Helsinki 2013. ISSN 1796-167X (verkkojulkaisu) Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4

KALEMA, T., JÓHANNESSEN, G., PYLSY, P. and HAGENGRAN, P., 2008. Accuracy of energy analysis of buildings: A comparison of a monthly energy balance method and simulation methods in calculating the energy consumption and the effect of thermal mass. Journal of Building Physics, 32(2), pp. 101-130.

KAUPPALEHTI, 2015. Kotimaisen polttokennon läpimurto on lähellä. [Online]. [Viitattu: 25.5.2016]. Saatavissa: <http://www.kauppalehti.fi/uutiset/kotimaisen-polttokennon-lapimurto-on-lahella/qfdSjGCR>

KAURANEN, P., SOLIN, J., TÖRRÖNEN, K., KOIVULA, J., LAURIKKO, J. 2013. Vetytiekartta – Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle. Tutkimusraportti VTT-R-02257-13.

KOCH, N., FUSS, S., GROSJEAN, G. and EDENHOFER, O., 2014. Causes of the EU ETS price drop: Recession, CDM, renewable policies or a bit of everything?—New evidence. *Energy Policy*, 73, pp. 676-685.

KOKKO, O., 2016a. Harva välttöy kalliimmalta sähköltä: "Siirtohinta nousee vastaisuudessaakin". *Taloussanomat*. [Online]. [Viitattu: 20.5.2016]. Saatavissa: <http://www.taloussanomat.fi/energia/2016/02/02/harva-valttöy-kalliimmalta-sahkolta-siirtohinta-nousee-vastaisuudessaakin/20161252/12>

KRAMER, M.R. and PORTER, M., 2011. Creating shared value. *Harvard business review*, 89(1/2), pp. 62-77.

KURNITSKI, J., SAARI, A., KALAMEES, T., VUOLLE, M., NIEMELÄ, J. and TARK, T., 2011. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. *Energy and Buildings*, 43(11), pp. 3279-3288.

LAHDELMA, R. and SALMINEN, P., 2001. SMAA-2: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. *Operations research*, 49(3), pp. 444-454.

LAMPINEN, M., 2011. Termodynamiikan perusteet. Oppikirja. 6. painos. Otatieto. ISBN: 9789516723689

LAURIKKA H, AHO L, 2015. Ympäristöministeriö. [Online]. [Viitattu: 3.5.2016]. Saatavissa: [http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kohti_nollapaasto_ja_blogi_ilmastonmuutoksesta/Ensimmäiset_maat_antaneet_panoksensa_Par\(33097\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kohti_nollapaasto_ja_blogi_ilmastonmuutoksesta/Ensimmäiset_maat_antaneet_panoksensa_Par(33097))

LEHTONEN, JM., 2004. Tuotantotalous. Porvoo: WS Bookwell Oy. ISBN 951-0-28104-2.

SUBERU, M. MUSTAFA, M. BASHIR, N., 2014. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 35, July 2014, Pages 499-514, ISSN 1364-0321.

MERTENS, K., 2013. Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-118-63416-5.

MOTIVA, 2007. Työasemaympäristön sähkönsäästö, laskentapohja.

MOTIVA, 2008. Lämpöä ilmassa. [Online]. [Viitattu: 9.6.2016]. Saatavissa: http://motiva.fi/files/211/Lampoa_ilmassa_Lammitysjarjestelmat_ilmalampopumppu.pdf

MOTIVA, 2012. Kiinteistön energiatehokkaat sähkötekniiset ratkaisut. [Online]. [Viitattu: 1.6.2016]. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/files/7974/Kiinteiston_energiatehokkaat_sahkotekniset_ratkaisut.pdf

MOTIVA, 2015a. Ilma-vesilämpöpumppu, UVLP. [Online]. Viitattu: 9.6.2016]. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/ilma-vesilampopumppu_uvlp

MOTIVA, 2015b. Investointituet uusiutuvalle energialle. [Online]. Viitattu: 29.6.2016. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuvan_energian_tuet/investointituet_uusiutuvalle_energialle

MOTIVA, 2016a. Lämpöenergian vuosittaisia rakennustyyppikohtaisia ominaiskuluksia (kWh/r-m^3) raportoidussa palvelusektorin rakennuskannassa. [Online]. Viitattu: 3.6.2016. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/files/10852/Ominaiskulutus_Lampo.pdf

MOTIVA, 2016b. Sähköenergian vuosittaisia rakennustyyppikohtaisia ominaiskuluksia (kWh/r-m^3) raportoidussa palvelusektorin rakennuskannassa. [Online]. Viitattu: 3.6.2016. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/files/10851/Ominaiskulutus_Sahko.pdf

MOTIVA, 2016c. Energialähteet: Vety. [Online]. [Viitattu: 9.6.2016]. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety

MOTIVA, 2016d. Polttokennoautot. [Online]. [Viitattu: 9.6.2016]. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/polttokennoautot

MOTIVA, 2016e. Huolto ja kunnossapito. [Online]. [Viitattu: 9.7.2016]. Saatavissa:

http://motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/huolto_ja_kunnossapito

MOTIVA, 2016f. Ylijäämäsähkön myynti. [Online]. [Viitattu: 9.7.2016]. Saatavissa:

http://motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaamasahkon_myynti

MOTIVA, 2016g. Aurinkosähköteknologiat. [Online]. [Viitattu: 9.7.2016]. Saatavissa:

http://motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat

MOTIVA, 2016h. Sähköautot. [Online]. [Viitattu: 9.8.2016]. Saatavissa:

http://motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat

MOTIVA, 2016i. CO₂-päästökertoimet. [Online]. [Viitattu: 13.8.2016]. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/taustatietoa/energiankaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet

MOTIVA, 2016j. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. [Online]. [Viitattu: 13.9.2016]. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa

NORD POOL, 2016a. Day-ahead market. [Online]. [Viitattu: 9.10.2016]. Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/How-does-it-work/Day-ahead-market-Elspot/>

NORD POOL, 2016b. Intraday market. [Online]. [Viitattu: 9.10.2016]. Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/How-does-it-work/Intraday-market/>

PALONEN, J., 2012. KERROSTALON ILMASTONMUUTOS (KIMU) Talotekniikkajärjestelmät-tietokartoitus.

PELTONIEMI, S. and KUKKONEN, I., 1995. Kivilajien lämmönjohtavuus Suomessa: Yhteenveto mittauksista 1964 - 1994. Geologian tutkimuskeskus. Geofysiikan osasto. Geoterminen laboratorio. Raportti Q18/95/1.

PESOLA, A., VANHANEN, J., HAGSTRÖM, M., KARTTUNEN, V., LARVUS, L., HAKALA, L., VEHVILÄINEN, I. and OY, G.C., 2014. Sähkön pientuotannon kilpailukyvyn ja kokonaistaloudellisten hyötyjen analyysi. Loppuraportti. Gaia Consulting Oy. Julkaistu, 3, pp. 2014.

PRASAD, D. and SNOW, M., 2014. Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics (BiPV). Routledge.

PÖYRY MANAGEMENT CONSULTING OY, 2016. EU:n 2030 ilmasto- ja energiapoliittikan linjausten toteutusvaihtoehdot ja Suomen omien energia- ja ilmastavoitteiden toteutuminen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 28/2016, pp. 1-97. ISBN 978-952-287-264-7.

PÖYRY, 2010a. Vihreiden toimitilojen kysyntä. Markkinaselvitys 2010. Toimitilat ja ympäristö Suomessa. [Online]. [Viitattu: 14.7.2016]. Saatavissa:

http://www.granlund.fi/site/assets/files/2439/222_0-2.pdf

PÖYRY, 2010b. Kaukolämpöjärjestelmän paluuvien hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. [Online]. [Viitattu: 20.7.2016]. Saatavissa:

http://energia.fi/sites/default/files/paluuvesilammitys_loppuraportti_20100224.pdf

RAKLI RY, 2014. Vihreydelle enemmän arvoa kiinteistöjen markkinoinnissa. [Online]. [Viitattu: 15.7.2016]. Saatavissa: <http://www.rakli.fi/raklin-uutiskooste/vihreydelle-enemman-arvoa-kiinteistojen-markkinoinnissa.html>

RUUKKI, 2015. Ruukki launches on-wall solar panels. [Online]. Viitattu: 20.6.2016. Saatavissa: <http://www.ruukki.com/b2b/this-is-us/news/news-details/12-05-2015-ruukki-launches-on-wall-solar-panels>

SEPPONEN, M., NIEMINEN, J., TUOMINEN, P., KOUHIA, I., SHEMEIKKA, J., VIKARI, M., HEMMILÄ, K. and NYKÄNEN, V., 2013. Lähes nollaenergiatalon suunnitteluohjeet.

SEPPÄNEN, O. 2001. Rakennusten lämmitys. 2. painos. Suomen LVI-liitto ry. 444 s. ISBN 951-98811-0-7

SHEMEIKKA, J., KOSONEN, R., HOVING, P., LAITILA, P., 1996. Rakennuksen sähköenergiankulutuksen tavoitearvot. VTT tiedotteita. [Online]. [Viitattu: 3.5.2016]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1996/T1756.pdf>

SKISTAD, H. and AS, S.E., 2003. Efficient Ventilation: Displacement Ventilation And Air Curtain Zoning.

TILASTOKESKUS, 2016. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. [Viitattu 5.4.2016]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2016/01/ehi_2016_01_2016-06-08_kuv_005_fi.html

STENROOS M, 2016. Väärin lobattu? Komissio ei taivu ymmärtämään suomalaista metsää. [Online]. [Viitattu: 19.11.2016]. Saatavissa: <http://yle.fi/uutiset/3-9292878>

SUOMEN HALLITUS, 2014. HE 76/2014. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi terveydensuojelulain muuttamisesta.

TASPOWER, 2016. MonoSun Technology Co., Ltd. [Online]. Viitattu: 9.7.2016. Saatavissa: <http://www.taspower.com/>

TEKES, 2014. Polttokennot-ohjelman loppuraportti 2007 – 2013. Raportti 1/2014. Helsinki, 2014. Saatavissa: https://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/polttokennot_ohjelman_loppuraportti_1_2014.pdf

TEKES, 2016. Terveisiä Tokion Fuel Cell Exposta. [Online]. [Viitattu: 3.6.2016]. Saatavissa: <http://www.tekes.fi/nyt/uutiset-2016/terveysia-tokion-fuel-cell-exposta/>

TEM, 2016. Energiatuki. [Online]. [Viitattu: 5.4.2016]. Saatavissa: https://www.tem.fi/energia/energiatuki/tuen_maara

TRAFI, 2016. Sähkökäyttöiset autot. [Online]. [Viitattu: 14.8.2016]. Saatavissa: http://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset_autot

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2015. The Future Arrives for Five Clean Energy Technologies – 2015 Update. [Online]. [Viitattu: 12.6.2016]. <http://energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/Revolution-Now-11132015.pdf>

UNIVERSITY OF OREGON, SOLAR RADIATION MONITORING LABORATORY, 2007. Sun path chart program. [Online]. [Viitattu: 7.6.2016]. Saatavissa: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>

VERBENE, G., BONOMO, P., FRONTINI, F., VAN DEN DONKER, M., CHATZIPANAGI, A., SINAPIS, K. and FOLKERTS, W., 2014. BIPV Products for Facades and Roofs: a Market Analysis, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2014, pp. 3630-3636.

VIHANNINJOKI, V., 2015. Hajautettu energiantuotanto Suomessa, Nykytila ja tulevaisuus sekä vaikutukset ilmanlaatuun. Suomen ympäristökeskus SYKE. [Online]. [Viitattu: 3.7.2016]. Saatavissa: <http://www.syke.fi/download/noname/%7BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%7D/111845>

VILJAINEN, S. and KYLÄHEIKO, K., 2015. Tukimekanismeja ja tavoitekonflikteja Euroopan nykyisillä sähkömarkkinoilla: Uusiutuva energiapolitiikka. LUT Scientific and Expertise Publications/Raportit ja selvitykset-Reports.

VIRTANEN, H. Tuulesta sähköä neljään lamppuun. [Online]. [Viitattu 16.6.2016]. Saatavissa: <http://www.maaseuduntulevaisuus.fi/politiikka-ja-talous/tuulesta-s%C3%A4hk%C3%B6%C3%A4-nelj%C3%A4%C3%A4n-lamppuun-1.24921>

VTT, 2015. Suomalaisella polttokenno-osaamisella tehdään puhdasta energiaa italialaisesta jätevedestä. [Online]. 14.12.2015. [Viitattu: 7.5.2016]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/suomalaisella-polttokenno-osaamisella-tehd%C3%A4%C3%A4n-puhdasta-energiaa-italialaisesta-j%C3%A4tevedest%C3%A4>

VTT, 2015b. Uuden sukupolven kestäville polttokennoilla vähäpäästöistä sähköä. [Online]. [Viitattu: 7.5.2016]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/uuden-sukupolven-kest%C3%A4vill%C3%A4-polttokennoilla-v%C3%A4h%C3%A4p%C3%A4st%C3%B6ist%C3%A4-s%C3%A4hk%C3%B6%C3%A4>

VTT, 2016. Ensimmäinen aurinkosähköllä polttoainetta tuottava koelaitos Suomeen. [Online]. [Viitattu: 16.6.2016]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/ensimm%C3%A4inen-aurinkos%C3%A4hk%C3%B6ll%C3%A4-polttoainetta-tuottava-koelaitos-suomeen>

WANG, J., JING, Y., ZHANG, C. and ZHAO, J., 2009. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9), pp. 2263-2278.

WEISSTEIN, E., 2016. Derivative. MathWorld - A Wolfram Web Resource. Wolfram Research. [Online]. [Viitattu 16.11.2016]. Saatavissa: <http://mathworld.wolfram.com/Derivative.html>

WENNERSTRÖM, M., LEPPÄHARJU, N., SALLASMAA, O., KESKISAARI, K., KALLIO, J., 2014. GEOENERGIAPOTENTIAALIN SELVITYS KOTKAN, HAMINAN, VIROLAHDEN JA MIEHIKKÄLÄN ALUEELTA.

WESTIN, J., 2011. Wind Actions on Flat-Roof-Mounted Photovoltaic Panels: a Comparison of Design Guidelines. TVBK.

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ 2011a. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma: Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012. Annettu 30.3.2011. [Viitattu 6.7.2016]. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ 2011b. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma: Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012. Annettu 30.3.2011. [Viitattu 6.7.2017]. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ, 2013a. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ohjeet 2012. Ympäristöministeriön ohjeet rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta. [Viitattu 6.7.2016]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B8C5C3B41-E127-4889-95B0-285E9223DEE6%7D/40468>

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ, 2013b. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta. [Viitattu: 7.6.2016]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B27BAFE2B-E645-4464-AFB8-CBFB162B5ADC%7D/31591>

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ, 2016a. Pariisin ilmastopöytäkirja. [Online]. [Viitattu 16.11.2016]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/pariisi2015>

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ, 2016b. Mitä on kestävä kehitys. [Online]. [Viitattu 13.8.2016]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-fi/ymparisto/kestava_kehitys/mita_on_kestava_kehitys

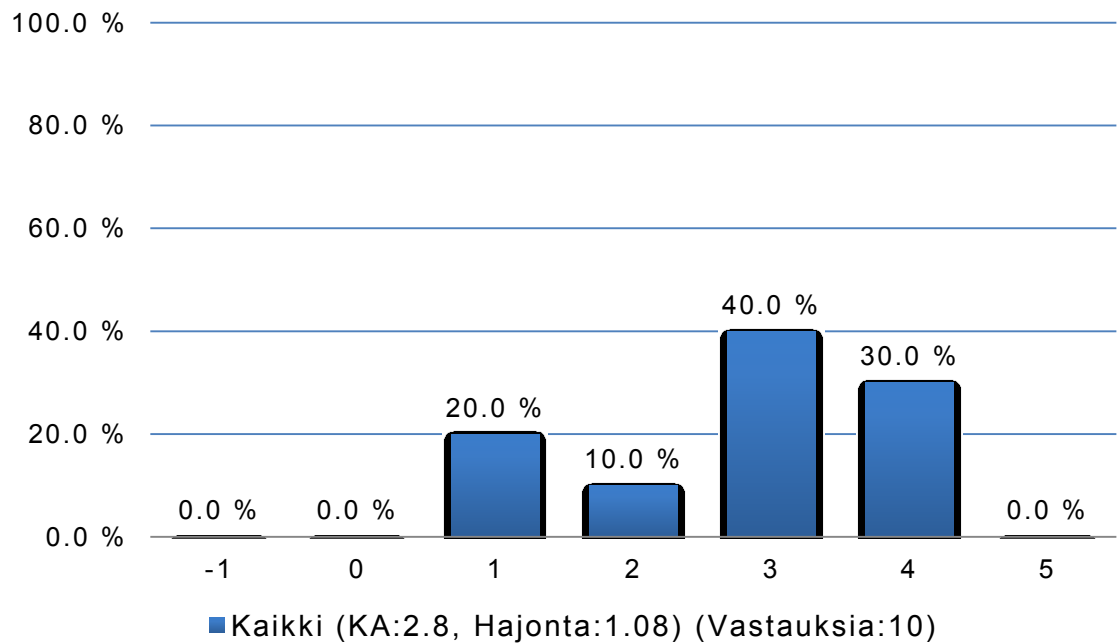
ÖLJY- JA BIOPOLTTOAINEALA RY, 2016. [Online]. [Viitattu 5.8.2016]. Saatavissa: <http://www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/18-bensiinin-reaalihinnan-kehitys>

Liiteluettelo

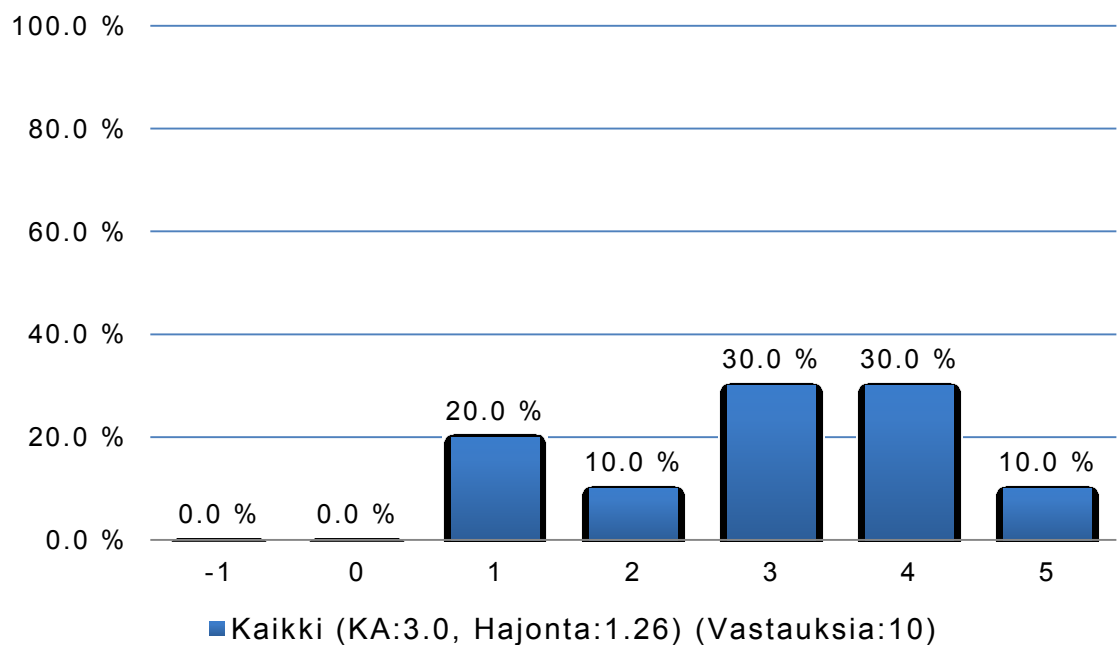
Liite 1. Asiantuntijapaneelin tulokset

Liite 1. Asiantuntijapaneelin tulokset

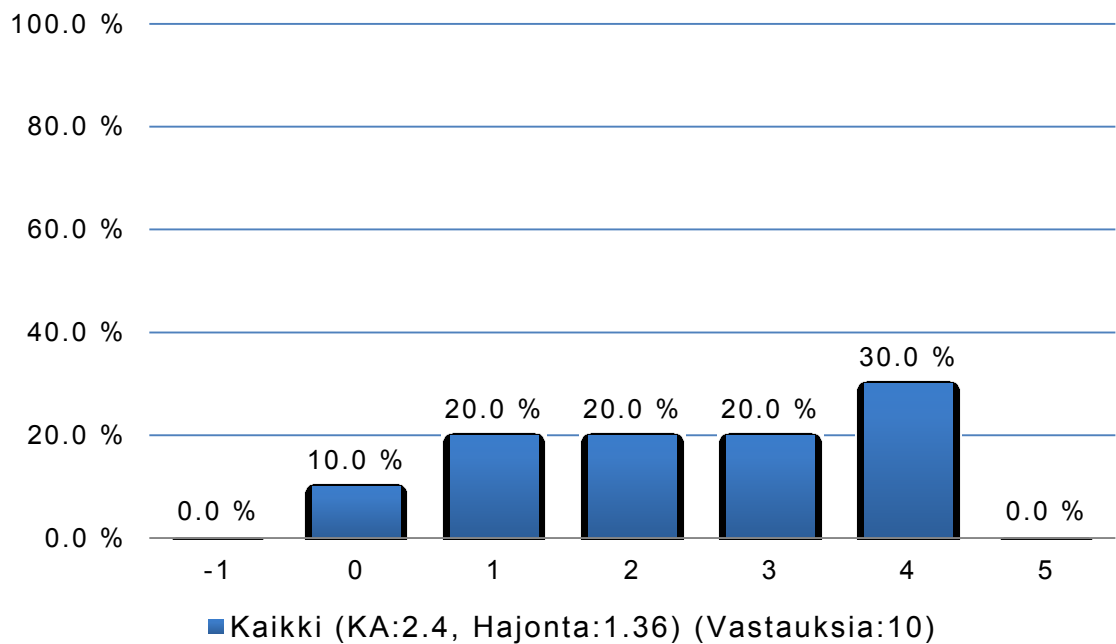
1. Aurinkopaneelit katolla



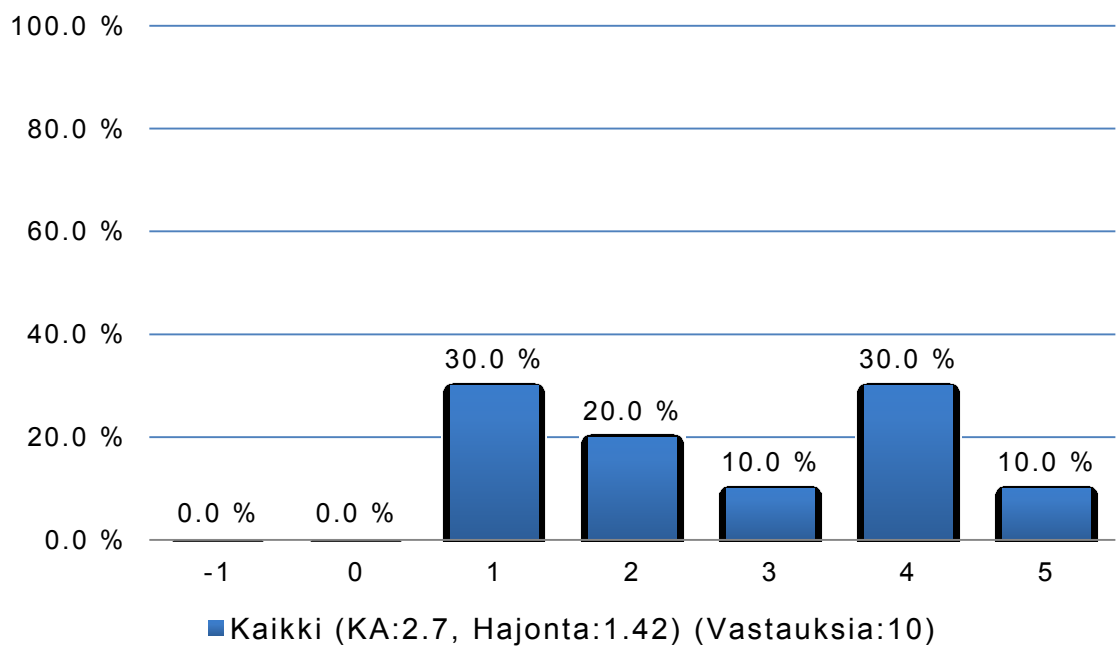
2. Aurinkopaneelit julkisivulla



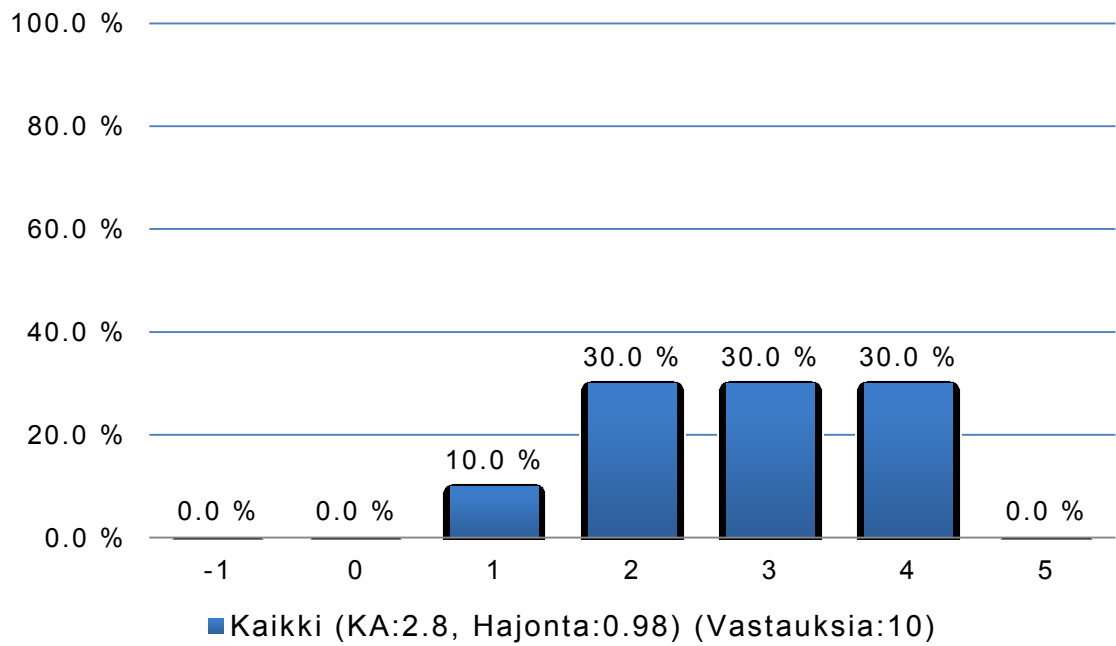
3. Aurinkopaneelikatkos sähköautojen latauspisteillä



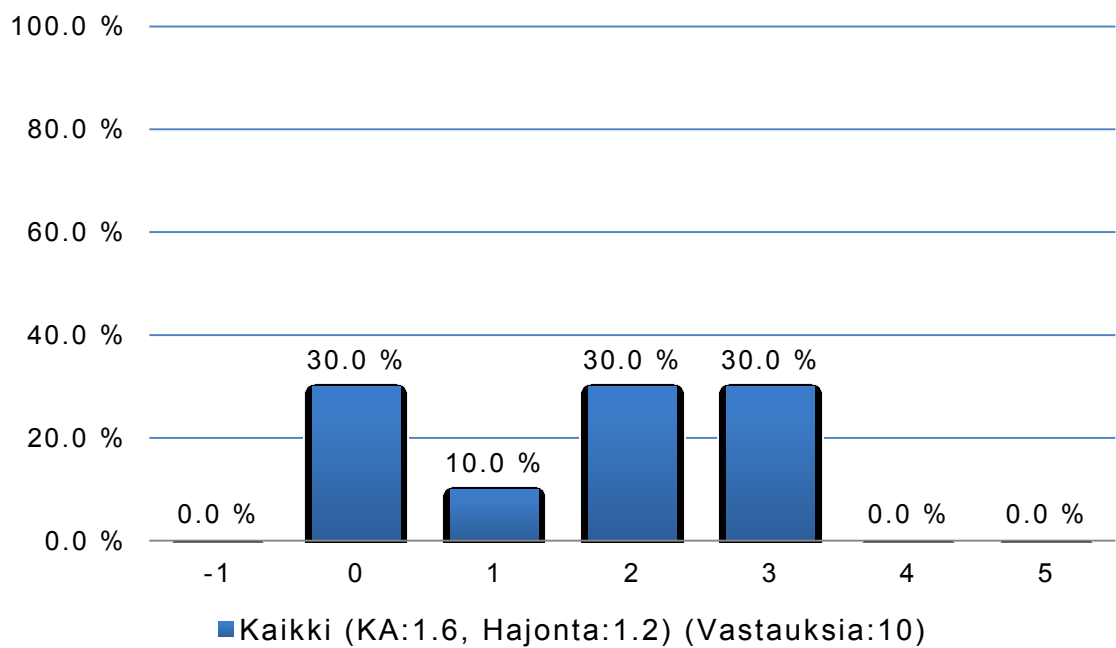
4. Lasikatettu sisäpiha (säästää sähköenergiankulutuksessa sekä lisäkäyttöä sisäpihalle)

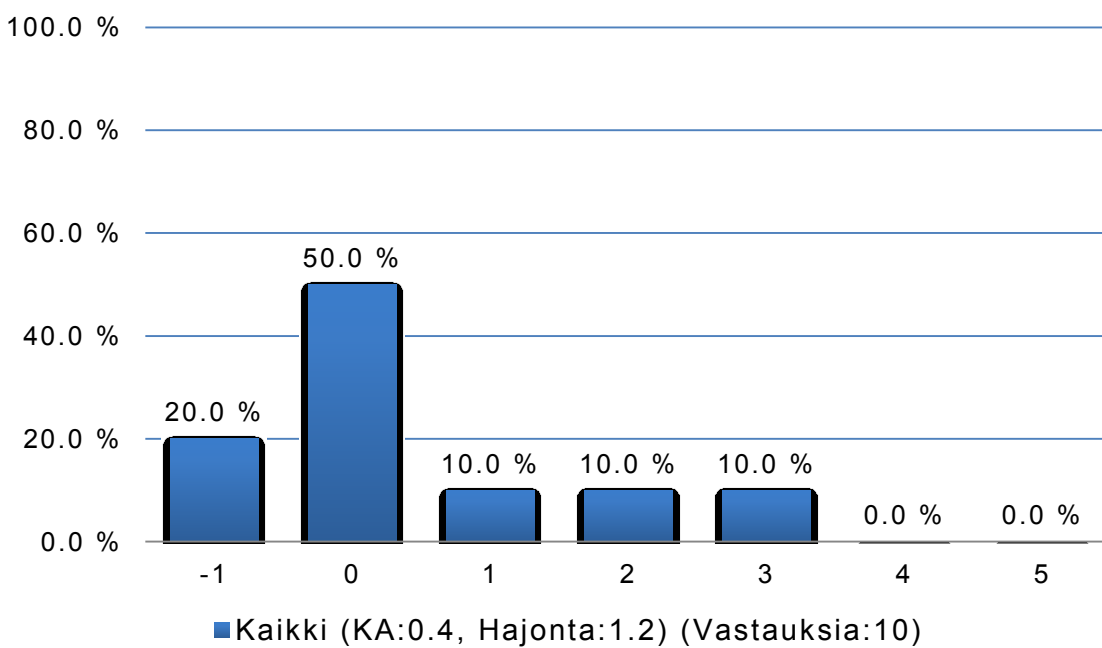


5. Maalämpöjärjestelmä

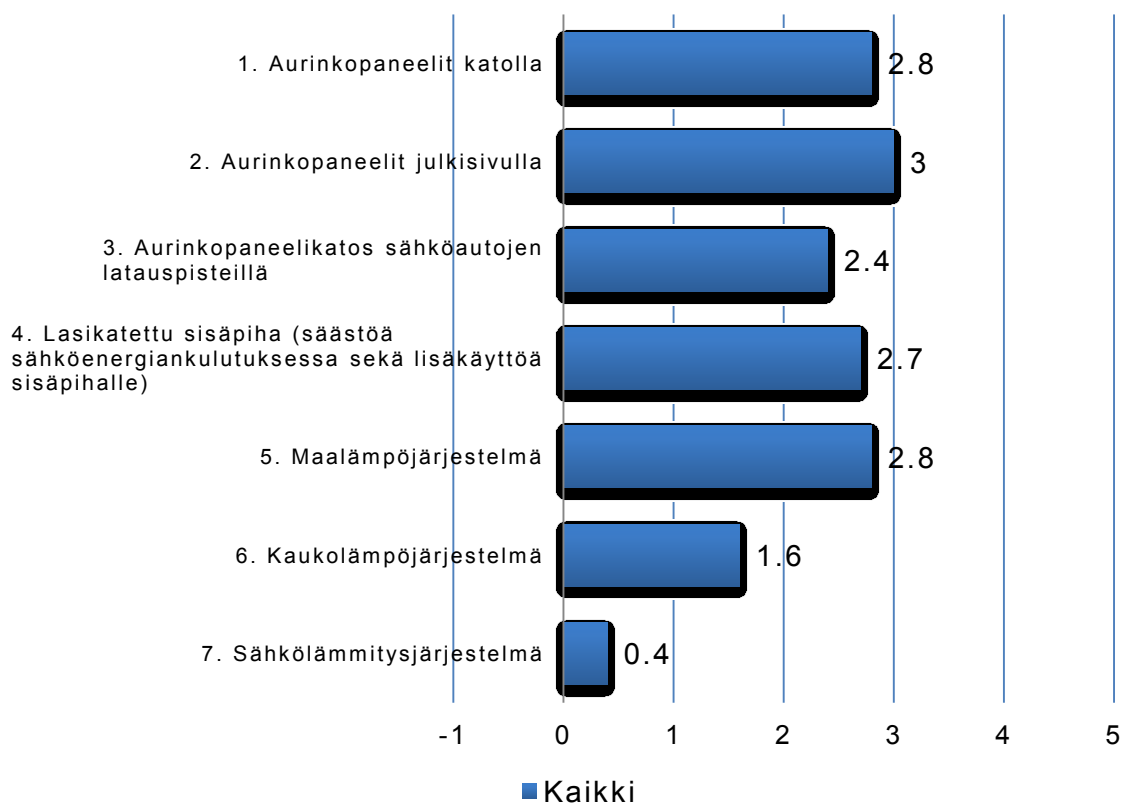


6. Kaukolämpöjärjestelmä

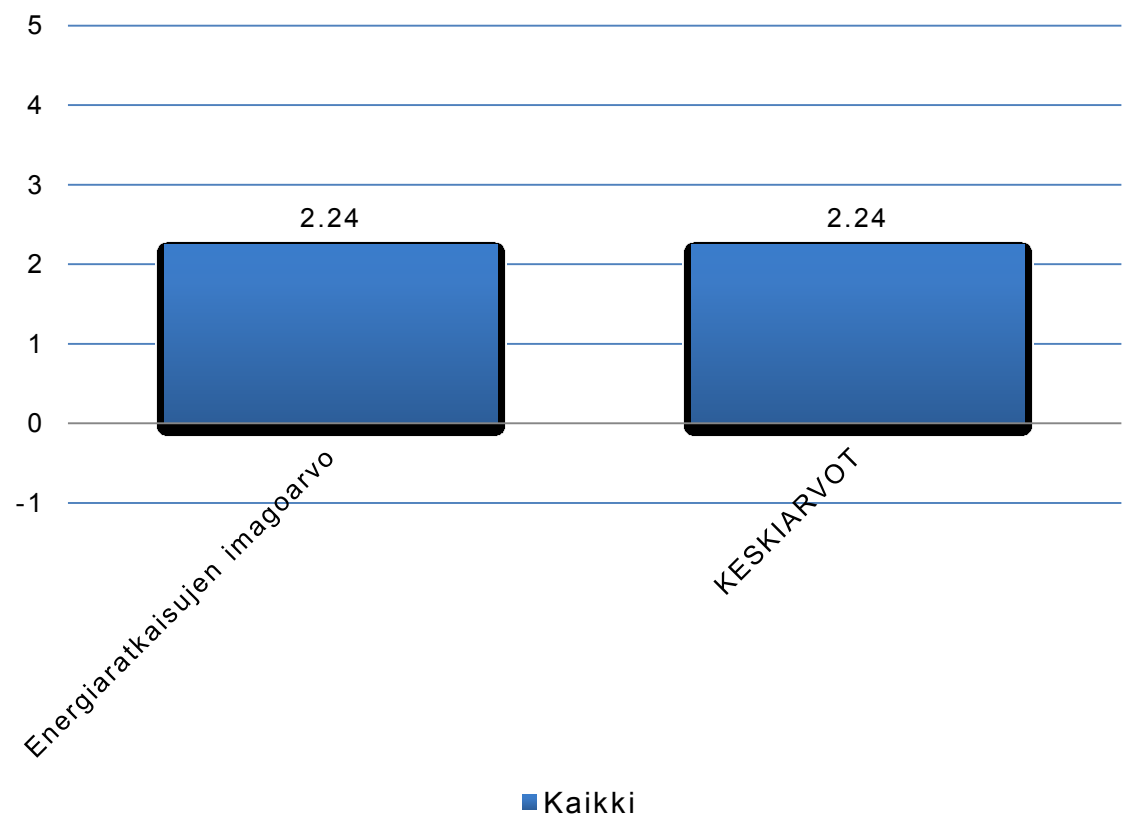


7. Sähkölämmitysjärjestelmä

Energiaratkaisujen imagoarvo



Osa-alueiden keskiarvot



Osa-alueiden keskiarvot suuruusjärjestyksessä

